

Генерация микроволнового–терагерцевого суперконтинуума в поле мощных фемтосекундных лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона*

А.В. Митрофанов, Д.А. Сидоров-Бирюков, А.А. Воронин, М.В. Рожко, П.Б. Глек, М.М. Назаров, Е.Е. Серебрянников, А.Б. Федотов

Отношение скорости движения электронов, индуцированных туннельной ионизацией и разогнанных мощным лазерным полем, к скорости света выступает одним из ключевых физических факторов, определяющих эффективность нелинейно-оптических процессов в плазменных средах. В настоящей работе впервые продемонстрировано, что мощные сверхкороткие импульсы с центральной длиной волны в среднем инфракрасном диапазоне усиливают плазменные нелинейности, связанные в первую очередь с индуцируемыми мощным лазерным полем в воздухе внутриплазменными токами. На этой основе удастся реализовать лазерно-плазменные схемы эффективной генерации когерентного широкополосного электромагнитного излучения терагерцевого и микроволнового диапазонов – микроволнового–терагерцевого суперконтинуума в газовых средах.

Ключевые слова: нелинейная оптика, лазерно-индуцированная плазма, плазменные токи, терагерцевое и микроволновое излучения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№18-29-20031 и 20-21-00140).

Введение

Нелинейно-оптические свойства плазмы, возникающей при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом, широко исследуются начиная с самых ранних этапов лазерной физики и нелинейной оптики [1, 2]. Понимание оптических нелинейностей плазмы необходимо для выяснения ограничений на параметры световых импульсов в мощных лазер-

ных системах [2, 3]. На основе нелинейно-оптического отклика плазмы удастся реализовать эффективные схемы преобразования частоты мощного лазерного излучения [4, 5].

Плазма, формируемая в поле мощных сверхкоротких лазерных импульсов, позволяет наблюдать новые нелинейно-оптические явления и реализовать новые режимы нелинейной динамики сверхкоротких световых импульсов [6–13]. На основе оптических нелинейностей такой плазмы удастся обеспечить высокую эффективность генерации гармоник высокого порядка [6, 9–13] и терагерцевого (ТГц) излучения [14–21], а также осу-



МИТРОФАНОВ
Александр Вячеславович
Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН



СИДОРОВ-БИРЮКОВ
Дмитрий Александрович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



ВОРОНИН
Александр Александрович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



РОЖКО
Михаил Викторович
Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий – Российский квантовый центр



ГЛЕК
Павел Борисович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



НАЗАРОВ
Максим Михайлович
НИЦ «Курчатовский институт»



СЕРЕБРЯННИКОВ
Евгений Евгеньевич
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



ФЕДОТОВ
Андрей Борисович
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

существовать уникальные режимы сверхширокополосных нелинейно-оптических взаимодействий [22, 23] и временного сжатия мощных световых импульсов [24].

Широкий класс нелинейно-оптических явлений в формируемой сверхкороткими лазерными импульсами плазме обусловлен плазменными токами, вызываемыми продольным электрическим полем кильваторной волны лазерного импульса [25, 26]: $E_z \approx \pi^2 m c a_0^2 / (2e\tau_p)$, где $a_0 = eE_0 / (mc\omega_0)$ – лазерный пондеромоторный потенциал, e , m – заряд и масса электрона, E_0 и ω_0 – амплитуда и центральная частота лазерного поля, τ_p – длительность лазерного импульса. Как следует из приведенного выражения, при $a_0 \ll 1$, то есть при малом отношении скорости нерелятивистского электрона $v = eE_0 / (m\omega_0)$ к скорости света c , поле E_z является слабым; v/c -малость поля E_z является отражением его пондеромоторной природы. Однако это поле увеличивается пропорционально квадрату длины волны лазерного излучения $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$. Такой закон масштабирования замечателен с физической точки зрения. Он показывает, что, несмотря на всю сложность нелинейных электродинамических явлений, обуславливающих формирование полей в кильваторной волне лазерного импульса, масштабирование $W_p \propto \lambda_0^2$, диктуемое уравнениями ньютоновой динамики для кинетической энергии электрона E_p в поле электромагнитного излучения с длиной волны λ_0 , выполняется и для самосогласованного внутриплазменного поля E_z . Согласно закону масштабирования $E_z \propto \lambda_0^2$ увеличение длины волны лазерного излучения должно приводить к существенному увеличению эффективности нелинейно-оптических взаимодействий, обусловленных возникающими благодаря полю E_z продольными плазменными токами.

Предметом настоящей работы является исследование плазменных нелинейностей, связанных в первую очередь с индуцируемыми мощным лазерным полем среднего ИК-диапазона в воздухе внутриплазменными токами в широком диапазоне давлений воздуха. Такие нелинейности позволяют продемонстрировать лазерно-плазменные методы эффективной генерации когерентного широкополосного электромагнитного излучения терагерцевого и микроволнового диапазонов – микроволнового–терагерцевого суперконтинуума.

Результаты и обсуждение

Для генерации мощных сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона в наших экспериментах используется лазерная система [27, 28] (рис. 1), состоящая из фемтосекундного Yb:CaF₂-лазера с регенеративным усилением, трехступенчатого оптического параметрического источника широкополосного поля затравки и трехступенчатого оптического параметрического усилителя chirпированных импульсов (ОПУЧИ). Им-

пульсы, формируемые регенеративным усилителем Yb:CaF₂-системы, используются в качестве излучения накачки в схеме трехступенчатого оптического параметрического усиления (ОПУ), позволяющего получить импульсы излучения с центральной длиной волны 1460 нм и длительностью около 200 фс. Эти импульсы растягиваются во времени с помощью гризменного стретчера и используются в качестве сигнальной волны в схеме трехступенчатого ОПУЧИ, реализуемого в трех установленных последовательно кристаллах КТА. Полем накачки для этого процесса служат импульсы излучения Nd:YAG-лазера длительностью около 100 пс, передаваемые в трех пучках с энергиями 50, 250 и 700 мДж, обеспечивающими оптическую накачку трех кристаллов КТА в системе ОПУЧИ. Импульсы холостой волны, формирующиеся в этой системе, характеризуются широким спектром с центральной длиной волны $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм и имеют энергию до 50 мДж. Сжатие этих импульсов с помощью решеточного компрессора позволяет получить импульсы среднего ИК-диапазона с энергией E_0 до 35 мДж и длительностью τ_0 около 80 фс [28, 29], что соответствует пиковой мощности $P_0 \approx 0.44$ ТВт.

С помощью линзы с фокусным расстоянием 50 см лазерное излучение среднего ИК-диапазона фокусируется в вакуумную камеру (рис. 1). Давление газа p в вакуумной камере варьируется в диапазоне от 0.01 мбар до 1.5 бар. Лазерная плазма, формируемая в области фокуса лазерного пучка, служит источником широкополосного вторичного излучения. Для исследования спектральных, временных и поляризационных свойств этого излучения, а также для анализа его диаграммы направленности используется система регистрации (рис. 1), в состав которой входят детекторы на основе коаксиально-волновых переходов (КВП) и широкополосных рупорных антенн (РА), работающие в различных областях ТГц- и СВЧ-диапазонов и обеспечивающие возможность регистрации вторичного излучения плазмы

в диапазоне от 0.5 ГГц до 30 ТГц. Для исследования формы импульса ТГц-СВЧ-излучения используется петлевой проволочный зонд [14, 30], работающий по принципу пояса Роговского [31]. Сигналы, регистрируемые КВП-и РА-детекторами, а также петлевым зондом, анализируются с помощью скоростного осциллографа с полосой пропускания не менее 50 ГГц.

Для исследования свойств ТГц-излучения на выходное окно вакуумной камеры устанавливался ТГц-фильтр из полипропилена или политетрафторэтилена (рис. 1), а также набор фильтров, необходимый для выделения требуемого частотного диапазона. С помощью пары параболических зеркал ТГц-излучение вначале коллимировалось, а затем фокусировалось либо на рабочую поверхность пироэлектрического измерителя мощности, либо на пироэлектрическая матрицу анализатора профиля пучка.

На рис. 2а представлены измеренные с помощью РА-детектора характерные временные профили импульса СВЧ-ТГц-излучения лазерной плазмы, генерируемой импульсами излучения среднего ИК-диапазона ($\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, $\tau_0 \approx 80$ фс) с энергий $E_0 \approx 6$ мДж в газовой камере, заполненной атмосферным воздухом при трех значениях давления p . Для анализа спектра СВЧ-ТГц-излучения осуществляется вейвлет-преобразование временных трейсов, регистрируемых с помощью КВП-и РА-детекторов, а также с помощью петлевого зонда.

Для устранения шумов и артефактов, включая шумы и артефакты, связанные с влиянием электрического контура осциллографа, вейвлет-преобразование временных трейсов СВЧ-ТГц-сигналов осуществляется с мягким многоуровневым порогом, устанавливаемым для надежного, воспроизводимого определения спектра СВЧ-ТГц-излучения. Выполненный на основе такой процедуры спектральный анализ показывает, что низкочастотное крыло спектра СВЧ-ТГц-излучения в выполненных экспериментах простирается вплоть до нижней

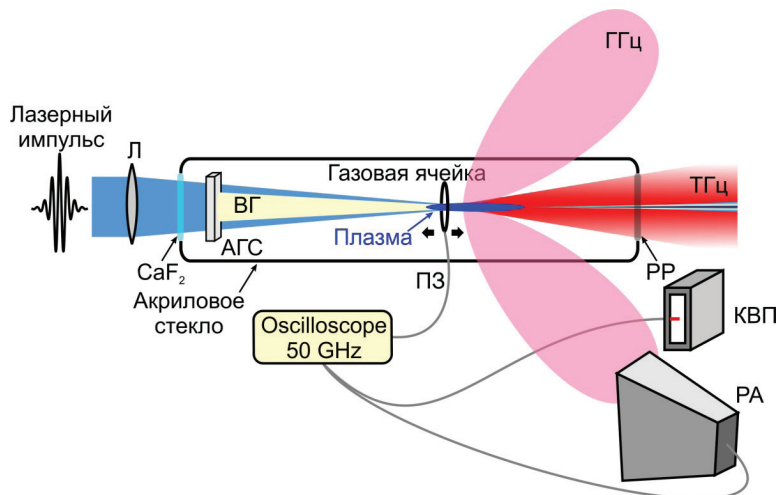


Рис. 1. Схема генерации широкополосного гигагерцевого-терагерцевого суперконтинуума в поле сверхкоротких лазерных импульсов: РА – широкополосная рупорная антенна, КВП – коаксиально-волновой переход, ПЗ – проволочный петлевой зонд, АГС – кристалл для генерации второй гармоники, ВГ – поле второй гармоники, Л – фокусирующая линза, РР – полипропиленовый терагерцевый фильтр.

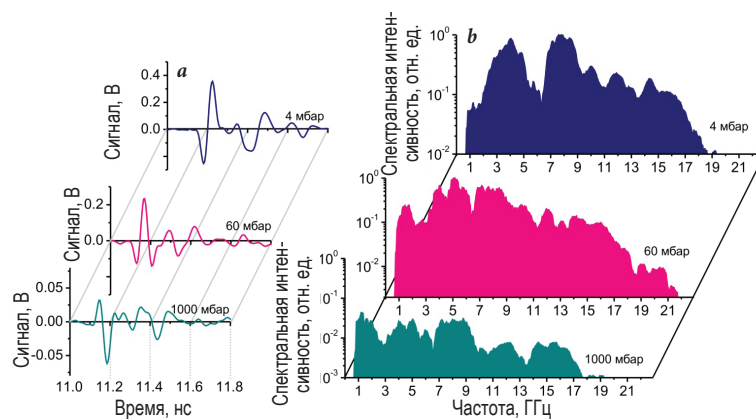


Рис. 2. Временная форма поля (а) и спектры (b) микроволнового излучения плазмы, индуцируемой лазерными импульсами ($\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, $\tau_0 \approx 80$ фс, $E_0 \approx 6$ мДж) в газовой камере, заполненной атмосферным воздухом при трех значениях давления p (указаны на рисунке).

границы регистрации используемого в экспериментах КВП-детектора, $\nu_c \approx 500$ МГц (рис. 2б, 3а, 3б). Спектральная ширина излучаемого в этих условиях СВЧ-ТГц-суперконтинуума (рис. 3б) значительно превышает ширину спектра низкочастотного вторичного излучения, наблюдаемого в экспериментах, выполняемых с использованием сверхкоротких импульсов ближнего ИК-диапазона, причем как субтераваттного, так и тераваттного уровней пиковой мощности.

На рис. 3а приведена карта, представляющая собой сводку спектров СВЧ-излучения плазмы, измеренных в широком диапазоне давлений газа в вакуумной камере (от 1.0 мбар до 1.5 бар) при фиксированных параметрах импульсов лазерного излучения: $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, $\tau_0 \approx 80$ фс, $E_0 \approx 10$ мДж. Как видно из представленных на рис. 3а экспериментальных данных, понижение давления газа от ≈ 1.0 –1.5 бар до ≈ 20 мбар позволяет значительно повысить интенсивность низкочастотного

крыла СВЧ–ТГц-суперконтинуума. Такая тенденция находится в хорошем согласии со свойствами нелинейного отклика плазмы, обусловленного плазменными токами, вызываемыми продольным электрическим полем кильватерной волны E_z . В рамках такой физической картины усиление низкочастотного крыла СВЧ-излучения при понижении давления газа от ≈ 1.0 – 1.5 бар до ≈ 20 мбар связано с уменьшением частоты электронных столкновений в плазме, приводящим к понижению минимальной частоты излучаемых плазмой волн [32, 33]. Уменьшение интенсивности излучения при дальнейшем понижении давления обусловлено падением нелинейности за счет уменьшения плотности участвующих в формировании плазменного тока частиц.

Энергия терагерцевой части суперконтинуума была измерена с помощью набора фильтров низких частот, стоящих перед пироэлектрическим LiTaO_3 -детектором, имеющим рабочий диапазон от ≈ 0.05 до ≈ 30 ТГц. Эти измерения показали, что полная энергия терагерцевой части суперконтинуума в диапазоне от ≈ 0.05 до ≈ 30 ТГц составляет порядка 15 мкДж в одном импульсе. По крайней мере, 4% этой энергии, то есть 0.6 мкДж, приходится на частоты ниже 300 ГГц, 10% этой энергии приходится на частотный диапазон от 0.05 до 0.5 ТГц и около 65% этой энергии приходится на частотный диапазон от 0.05 до 5 ТГц. Энергия микроволновой части суперконтинуума оценена исходя из максимальной амплитуды сигнала осциллографа (0.6 В на рис. 2а), его внутреннего сопротивления 50 Ом, длительности сигнала около 200 пс, эффективности преобразования коаксиально-волнового перехода 10% и угла раствора конуса микроволнового излучения около 20° и составила около 0.25 мкДж.

Исследование диаграммы направленности СВЧ-излучения производится путем измерения интенсивности СВЧ-сигнала Φ как функции угла θ между направлением

распространения и направлением на СВЧ-приемник (КВП- или РА-детектор, рис. 1). Получаемая при этом зависимость имеет максимум (рис. 3с), особенно ярко выраженный при низких давлениях газа, и с удовлетворительной точностью описывается функцией [34, 35] $\Phi(\theta, \omega) = \sin^2\theta \sin^{-4}(\theta/2) \times \sin^2[(\omega/c)L\sin^2(\theta/2)]$, соответствующей фактору фазового согласования черенковского излучения линейным источником с характерным размером L . Такие свойства диаграммы направленности СВЧ-излучения свидетельствуют о его когерентном характере.

Заключение

Таким образом, впервые выполненные экспериментальные исследования показывают, что взаимодействие фемтосекундных сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона субтераваттной мощности позволяет значительно усилить широкий класс v/c -слабых плазменных нелинейностей, связанных, в первую очередь, с индуцируемыми лазерным полем внутриплазменными токами. На этой основе удастся реализовать лазерно-плазменные схемы эффективной генерации когерентного широкополосного электромагнитного излучения ТГц- и СВЧ-диапазонов – ТГц–СВЧ-суперконтинуума в газовых средах.

Лазерные методы удаленной генерации электромагнитного поля с широкой диаграммой направленности востребованы в области дистанционного зондирования и детектирования. Описанная в данных исследованиях лазерно-плазменная система предоставляет новые подходы к решению этих задач, поскольку с ее помощью реализуется компактный плазменный источник интенсивного сверхширокого ТГц–СВЧ-излучения, который может быть создан удаленным (например, наземным) лазерным источником, генерирующим интенсивное СВЧ–ТГц-излучение под большими углами далеко за пределами поперечной плоскости генерации. Тем самым может быть создан мощный инструмент дистанцион-

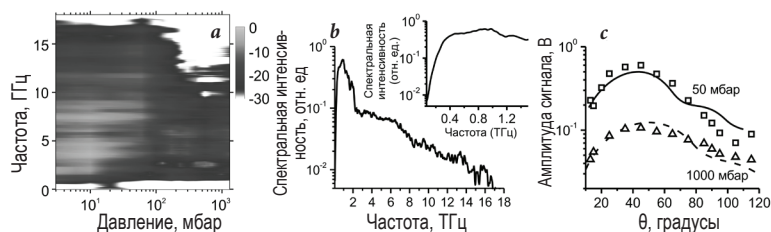


Рис. 3. а – Зависимость спектров микроволнового излучения плазмы, индуцируемой лазерными импульсами ($\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, $\tau_0 \approx 80$ фс, $E_0 \approx 10$ мДж) в газовой камере, заполненной атмосферным воздухом при варьируемом давлении. Значения давления p отложены по оси абсцисс; б – спектр терагерцевой части суперконтинуума из плазмы, индуцируемой импульсами излучения среднего ИК-диапазона ($\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, $\tau_0 \approx 80$ фс, $E_0 \approx 6$ мДж) с примесью слабого поля второй гармоники с центральной длиной волны около 1.95 мкм и длительностью импульса около 70 фс в газовой камере, заполненной атмосферным воздухом; в – зависимость амплитуды сигнала микроволнового излучения на коаксиально-волновом переходе с рабочим диапазоном частот от 5 до 15 ГГц от угла θ между осью распространения лазерного импульса и направлением от плазмы к детектору при давлениях воздуха 50 мбар (квадраты) и 1000 мбар (треугольники). Теоретическая аппроксимация этих зависимостей функцией $[\Phi(\theta)]^{1/2}$ показана кривыми.

ного зондирования и обнаружения газовых примесей, микрокапель и аэрозолей в атмосфере и на удаленных поверхностях.

Авторы выражают благодарность руководителю научной группы профессору А.М. Желтикову за координацию работы и неоценимую помощь при проведении исследований. Работа выполнена при поддержке Россий-

ского фонда фундаментальных исследований – проекты №18-29-20031 (экспериментальное исследование микроволнового излучения) и №20-21-00140 (экспериментальное исследование генерации ТГц-излучения). А.А. Воронин выражает благодарность Российскому научному фонду за поддержку в исследованиях в области мощных лазерных импульсов (проект №19-72-10054). Часть работы по генерации ТГц-излучения была выполнена в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Литература

1. В.Л. Гинзбург
Распространение электромагнитных волн в плазме, СССР, Москва, Физматгиз, 1960, 552 с.
2. N. Blombergen, Y.R. Shen
Phys. Rev., 1966, **141**, 298. DOI: 10.1103/PhysRev.141.298.
3. Н.Г. Басов, В.Ю. Бычков, О.Н. Крохин, М.В. Осипов, А.А. Рупасов, В.П. Силин, Г.В. Склизков, А.Н. Стародуб, В.Т. Тихончук, А.С. Шиканов
Квантовая электрон., 1979, **6**, 1829.
4. G.A. Mourou, T. Tajima, S.V. Bulanov
Rev. Mod. Phys., 2006, **78**, 309. DOI: 10.1103/RevModPhys.78.309.
5. А.М. Желтиков, Н.И. Коромеев
УФН, 1999, **169**, 385. DOI: 10.3367/UFNr.0169.199904b.0385.
6. U. Teubner, P. Gibbon
Rev. Mod. Phys., 2009, **81**, 445. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.445.
7. С.А. Ахманов, С.М. Гладков, Н.И. Коромеев, А.М. Желтиков
Генерация гармоник оптического излучения при рассеянии электронов на ионах, СССР, Москва, физический факультет МГУ, 1988, Препринт №5.
8. R.L. Carman, C.K. Rhodes, R.F. Benjamin
Phys. Rev. A, 1981, **24**, 2649. DOI: 10.1103/PhysRevA.24.2649.
9. T. Brabec, F. Krausz
Rev. Mod. Phys., 2000, **72**, 545. DOI: 10.1103/RevModPhys.72.545.
10. P.B. Corkum, F. Krausz
Nat. Phys., 2007, **3**, 381. DOI: 10.1038/nphys620.
11. С.М. Гладков, Н.И. Коромеев, А.М. Желтиков, А.Б. Федотов
Письма в ЖТФ, 1988, **14**, 1399.
12. A.B. Fedotov, S.M. Gladkov, N.I. Koroteev, A.M. Zheltikov
J. Opt. Soc. Am. B, 1991, **8**, 363. DOI: 10.1364/JOSAB.8.000363.
13. A.B. Fedotov, A.N. Naumov, V.P. Silin, S.A. Uryupin, A.M. Zheltikov, A.P. Tarasevich, D. von der Linde
Phys. Lett. A, 2000, **271**, 407. DOI: 10.1016/S0375-9601(00)00390-X.
14. K.Y. Kim, A.J. Taylor, J.H. Glowina, G. Rodriguez
Nat. Photonics, 2008, **2**, 605. DOI: 10.1038/nphoton.2008.153.
15. D.J. Cook, R.M. Hochstrasser
Opt. Lett., 2000, **25**, 1210. DOI: 10.1364/OL.25.001210.
16. S. Tzortzakis, G. Méchain, G. Patalano, Y.-B. André, B. Prade, M. Franco, A. Mysyrowicz, J.-M. Munier, M. Gheudin, G. Beaudin, P. Encrenaz
Opt. Lett., 2002, **27**, 1944. DOI: 10.1364/OL.27.001944.
17. X. Xie, J. Dai, X.-C. Zhang
Phys. Rev. Lett., 2006, **96**, 075005.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.075005.
18. M.D. Thomson, M. Kref, T. Löffler, H.G. Roskos
Laser Photonics Rev., 2007, **1**, 349. DOI: 10.1002/lpor.200710025.
19. T. Balčiūnas, D. Lorenc, M. Ivanov, O. Smirnova, A.M. Zheltikov, D. Dietze, K. Unterrainer, T. Rathje, G.G. Paulus, A. Baltuška, S. Haessler
Opt. Express, 2015, **23**, 15278. DOI: 10.1364/OE.23.015278.
20. D. Jang, R.M. Schwartz, D. Woodbury, J. Griff-McMahon, A.H. Younis, H.M. Milchberg, K.-Y. Kim
Optica, 2019, **6**, 1338. DOI: 10.1364/OPTICA.6.001338.
21. A.D. Koulouklidis, C. Gollner, V. Shumakova, V.Yu. Fedorov, A. Pugžlys, A. Baltuška, S. Tzortzakis
Nat. Commun., 2020, **11**, 292. DOI: 10.1038/s41467-019-14206-x.
22. A.V. Mitrofanov, D.A. Sidorov-Biryukov, M.M. Nazarov, A.A. Voronin, M.V. Rozhko, A.D. Shutov, S.V. Ryabchuk, E.E. Serebryannikov, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov
Optica, 2020, **7**, 15. DOI: 10.1364/OPTICA.7.000015.
23. А.М. Желтиков
УФН, 2006, **176**, 623. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200606d.0623.
24. A. Couairon, M. Franco, A. Mysyrowicz, J. Biegert, U. Keller
Opt. Lett., 2005, **30**, 2657. DOI: 10.1364/OL.30.002657.
25. P. Sprangle, J. Peñano, B. Hafizi, C. Kapetanakis
Phys. Rev. E, 2004, **69**, 066415. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066415.
26. I. Thiele, R. Nuter, B. Bousquet, V. Tikhonchuk, S. Skupin, X. Davoine, L. Gremillet, L. Bergé
Phys. Rev. E, 2016, **94**, 063202. DOI: 10.1103/PhysRevE.94.063202.
27. A.V. Mitrofanov, A.A. Voronin, D.A. Sidorov-Biryukov, A. Pugžlys, E.A. Stepanov, G. Andriukaitis, T. Flöry, S. Ališauskas, A.B. Fedotov, A. Baltuška, A.M. Zheltikov
Sci. Rep., 2015, **5**, 8368. DOI: 10.1038/srep08368.
28. A.V. Mitrofanov, A.A. Voronin, D.A. Sidorov-Biryukov, S.I. Mitryukovsky, A.B. Fedotov, E.E. Serebryannikov, D.V. Meshchankin, V. Shumakova, S. Ališauskas, A. Pugžlys, V.Ya. Panchenko, A. Baltuška, A.M. Zheltikov
Optica, 2016, **3**, 299. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000299.
29. A.V. Mitrofanov, A.A. Voronin, M.V. Rozhko, D.A. Sidorov-Biryukov, A.B. Fedotov, A. Pugžlys, V. Shumakova, S. Ališauskas, A. Baltuška, A.M. Zheltikov
Optica, 2017, **4**, 1405.
DOI: 10.1364/OPTICA.4.001405.
30. T.I. Oh, Y.S. You, N. Ithajj, E.W. Rosenthal, H.M. Milchberg, K.Y. Kim
New J. Phys., 2013, **15**, 075002.
DOI: 10.1088/1367-2630/15/7/075002.
31. W. Rogowski, W. Steinhaus
Archiv für Elektrotechnik, 1912, **1**, 141.
DOI: 10.1007/BF01656479.
32. I. Babushkin, S. Skupin, A. Husakou, C. Köhler, E. Cabrera-Granado, L. Bergé, J. Herrmann
New J. Phys., 2011, **13**, 123029.
DOI: 10.1088/1367-2630/13/12/123029.
33. A.A. Voronin, A.M. Zheltikov
Phys. Rev. A, 2020, **101**, 043813.
DOI: 10.1103/PhysRevA.101.043813.
34. C. D'Amico, A. Houard, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, A. Couairon, V.T. Tikhonchuk
Phys. Rev. Lett., 2007, **98**, 235002.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.235002.
35. C. D'Amico, A. Houard, S. Akturk, Y. Liu, M. Franco, B. Prade, A. Couairon, V. Tikhonchuk, A. Mysyrowicz
New J. Phys., 2007, **10**, 013015.
DOI: 10.1088/1367-2630/10/1/013015.

[illegible]

Generation of a Microwave-to-Terahertz Supercontinuum in the Field of High-Power Femtosecond Mid-Infrared Laser Pulses*

Alexander V. Mitrofanov

Institute on Laser and Information
Technologies, RAS, – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics”, RAS
1 Sviatozerskay Str., Shatura,
Moscow Reg., 140700, Russia
mitralex@inbox.ru

Dmitry A. Sidorov-Biryukov

Lomonosov Moscow State University
1-62 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
Dima-sidorov@mail.ru

Aleksandr A. Voronin

Lomonosov Moscow State University
1-62 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
aa.voronin@physics.msu.ru

Mikhail V. Rozhko

Russian Quantum Center
30-1 Bolshoi Blvd, Skolkovo,
Moscow, 143025, Russia
mv.rozhko@physics.msu.ru

Pavel B. Glek

Lomonosov Moscow State University
1-62 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
glek.pb14@physics.msu.ru

Maxim M. Nazarov

National Research Center
«Kurchatov Institute»
1 Kurchatov Sqr.,
Moscow, 123182, Russia
nazarovmax@mail.ru

Evgeny E. Serebryannikov

Lomonosov Moscow State University
1-62 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow,
119991, Russia
serebryannikov@gmail.com

Andrey B. Fedotov

Lomonosov Moscow State University
1-62 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
a.b.fedotov@physics.msu.ru

Abstract

The ratio of the velocity of laser-field-induced motion of electrons induced by tunneling ionization and speed of light is one of the key physical factors determining the efficiency of nonlinear optical processes in plasma media. We show that the use of powerful ultrashort pulses with a central wavelength in the mid-infrared range enhance plasma nonlinearities in air associated primarily with plasma currents induced by a intense laser field. On this basis, it is possible to implement laser-plasma schemes of the efficient generation of coherent broadband microwave and terahertz radiation, *i.e.* microwave–terahertz supercontinuum.

Keywords: nonlinear optics, high-power ultrashort laser pulses, laser-induced plasma, plasma currents, ionization, terahertz and microwave emission.

**The work was financially supported by RFBR (projects 18-29-20031 and 20-21-00140).*

Images & Tables

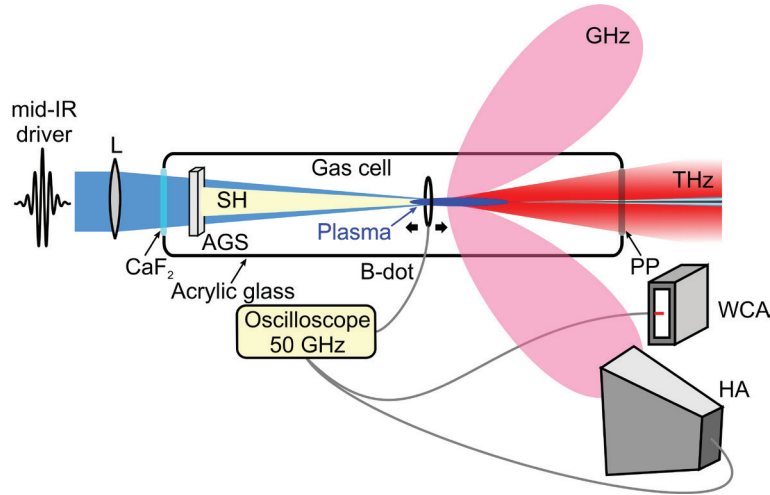


Fig. 1. Generation of the microwave-terahertz supercontinuum in the field of ultrashort laser pulses: HA – broadband horn antenna, WCA – waveguide coaxial adapter, B-dot – wire loop probe, AGS – crystal for the second-harmonic generation, SH – field of the second harmonic, L – focusing lens, and PP – set of THz filters.

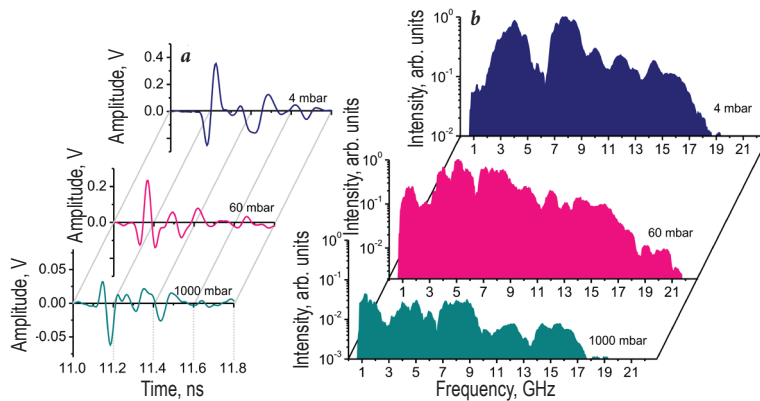


Fig. 2. *a* – Time traces and *b* – spectra of microwave radiation from the plasma induced by mid-infrared pulses ($\lambda_0 \approx 3.9 \mu\text{m}$, $\tau_0 \approx 80 \text{ fs}$, $E_0 \approx 6 \text{ mJ}$) in a gas chamber filled with atmospheric air at three pressures *p* indicated in the figure.

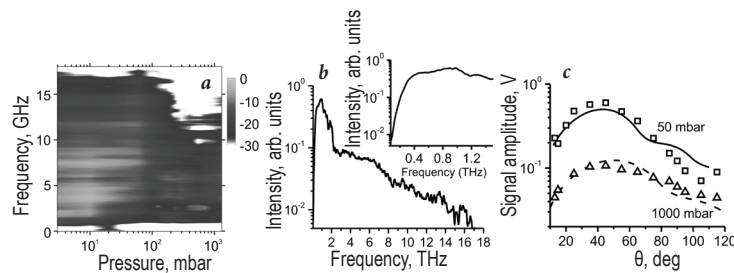


Fig. 3. *a* – Map of spectra of microwave radiation from the plasma induced by laser pulses ($\lambda_0 \approx 3.9 \mu\text{m}$, $\tau_0 \approx 80 \text{ fs}$, $E_0 \approx 10 \text{ mJ}$) in a gas chamber filled with atmospheric air at the pressure *p* shown on the horizontal axis; *b* – spectrum of terahertz part of supercontinuum from plasma induced by mid-infrared laser pulses ($\lambda_0 \approx 3.9 \mu\text{m}$, $\tau_0 \approx 80 \text{ fs}$, $E_0 \approx 6 \text{ mJ}$) with weak second harmonic ($1.95 \mu\text{m}$, 70 fs) in gas cell filled with atmospheric air; *c* – the microwave output measured as a function of θ : (symbols) experimental results and (lines) their best fit with the phase-matching function $[\Phi(\theta)]^{1/2}$.

References

1. V.L. Ginzburg
Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma [Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme], USSR, Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960, 552 pp. (in Russian).
2. N. Blombergen, Y.R. Shen
Phys. Rev., 1966, **141**, 298. DOI: 10.1103/PhysRev.141.298.
3. N.G. Basov, V.Yu. Bychenkov, O.N. Krokhin, M.V. Osipov, A.A. Rupasov, V.P. Silin, G.V. Sklizkov, A.N. Starodub, V.T. Tikhonchuk, A.S. Shikanov
Sov. J. Quantum Electron., 1979, **9**, 1081.
DOI: 10.1070/QE1979v009n09ABEH009430.
4. G.A. Mourou, T. Tajima, S.V. Bulanov
Rev. Mod. Phys., 2006, **78**, 309. DOI: 10.1103/RevModPhys.78.309.
5. A.M. Zheltikov, N.I. Koroteev
Physics-Uspekhi, 1999, **42**, 321.
DOI: 10.1070/PU1999v042n04ABEH000561.
6. U. Teubner, P. Gibbon
Rev. Mod. Phys., 2009, **81**, 445. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.445.
7. A. Akhmanov, S.M. Gladkov, N.I. Koroteev, A.M. Zheltikov
Generation of Optical Radiation Harmonics in the Scattering of Electrons by Ions [Generatsiya garmonik opticheskogo udara pri rasseyanii elektronov na ionakh], USSR, Moscow, Phys. Dep., MSU Publ., 1988, Preprint No. 5 (in Russian).
8. R.L. Carman, C.K. Rhodes, R.F. Benjamin
Phys. Rev. A, 1981, **24**, 2649. DOI: 10.1103/PhysRevA.24.2649.
9. T. Brabec, F. Krausz
Rev. Mod. Phys., 2000, **72**, 545. DOI: 10.1103/RevModPhys.72.545.
10. P.B. Corkum, F. Krausz
Nat. Phys., 2007, **3**, 381. DOI: 10.1038/nphys620.
11. S.M. Gladkov, N.I. Koroteev, A.M. Zheltikov, A.B. Fedotov
Sov. Tech. Phys. Lett., 1988, **19**, 610.
12. A.B. Fedotov, S.M. Gladkov, N.I. Koroteev, A.M. Zheltikov
J. Opt. Soc. Am. B, 1991, **8**, 363. DOI: 10.1364/JOSAB.8.000363.
13. A.B. Fedotov, A.N. Naumov, V.P. Silin, S.A. Uryupin, A.M. Zheltikov, A.P. Tarasevich, D. von der Linde
Phys. Lett. A, 2000, **271**, 407. DOI: 10.1016/S0375-9601(00)00390-X.
14. K.Y. Kim, A.J. Taylor, J.H. Glowina, G. Rodriguez
Nat. Photonics, 2008, **2**, 605. DOI: 10.1038/nphoton.2008.153.
15. D.J. Cook, R.M. Hochstrasser
Opt. Lett., 2000, **25**, 1210. DOI: 10.1364/OL.25.001210.
16. S. Tzortzakidis, G. Méchain, G. Patalano, Y.-B. André, B. Prade, M. Franco, A. Mysyrowicz, J.-M. Munier, M. Gheudin, G. Beaudin, P. Encrenaz
Opt. Lett., 2002, **27**, 1944. DOI: 10.1364/OL.27.001944.
17. X. Xie, J. Dai, X.-C. Zhang
Phys. Rev. Lett., 2006, **96**, 075005.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.075005.
18. M.D. Thomson, M. Krefß, T. Löffler, H.G. Roskos
Laser Photonics Rev., 2007, **1**, 349. DOI: 10.1002/lpor.200710025.
19. T. Balčiūnas, D. Lorenc, M. Ivanov, O. Smirnova, A.M. Zheltikov, D. Dietze, K. Unterrainer, T. Rathje, G.G. Paulus, A. Baltuška, S. Haessler
Opt. Express, 2015, **23**, 15278. DOI: 10.1364/OE.23.015278.
20. D. Jang, R.M. Schwartz, D. Woodbury, J. Griff-McMahon, A.H. Younis, H.M. Milchberg, K.-Y. Kim
Optica, 2019, **6**, 1338. DOI: 10.1364/OPTICA.6.001338.
21. A.D. Koulouklidis, C. Gollner, V. Shumakova, V.Yu. Fedorov, A. Pugžlys, A. Baltuška, S. Tzortzakidis
Nat. Commun., 2020, **11**, 292. DOI: 10.1038/s41467-019-14206-x.
22. A.V. Mitrofanov, D.A. Sidorov-Biryukov, M.M. Nazarov, A.A. Voronin, M.V. Rozhko, A.D. Shutov, S.V. Ryabchuk, E.E. Serebryannikov, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov
Optica, 2020, **7**, 15. DOI: 10.1364/OPTICA.7.000015.
23. A.M. Zheltikov
Physics-Uspekhi, 2006, **176**, 623.
DOI: 10.1070/PU2006v049n06ABEH005975.
24. A. Couairon, M. Franco, A. Mysyrowicz, J. Biegert, U. Keller
Opt. Lett., 2005, **30**, 2657. DOI: 10.1364/OL.30.002657.
25. P. Sprangle, J. Peñano, B. Hafizi, C. Kapetanakis
Phys. Rev. E, 2004, **69**, 066415. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066415.
26. I. Thiele, R. Nuter, B. Bousquet, V. Tikhonchuk, S. Skupin, X. Davoine, L. Gremillet, L. Bergé
Phys. Rev. E, 2016, **94**, 063202. DOI: 10.1103/PhysRevE.94.063202.
27. A.V. Mitrofanov, A.A. Voronin, D.A. Sidorov-Biryukov, A. Pugžlys, E.A. Stepanov, G. Andriukaitis, T. Flöry, S. Ališauskas, A.B. Fedotov, A. Baltuška, A.M. Zheltikov
Sci. Rep., 2015, **5**, 8368. DOI: 10.1038/srep08368.
28. A.V. Mitrofanov, A.A. Voronin, D.A. Sidorov-Biryukov, S.I. Mitryukovsky, A.B. Fedotov, E.E. Serebryannikov, D.V. Meshchankin, V. Shumakova, S. Ališauskas, A. Pugžlys, V.Ya. Panchenko, A. Baltuška, A.M. Zheltikov
Optica, 2016, **3**, 299. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000299.
29. A.V. Mitrofanov, A.A. Voronin, M.V. Rozhko, D.A. Sidorov-Biryukov, A.B. Fedotov, A. Pugžlys, V. Shumakova, S. Ališauskas, A. Baltuška, A.M. Zheltikov
Optica, 2017, **4**, 1405. DOI: 10.1364/OPTICA.4.001405.
30. T.I. Oh, Y.S. You, N. Jhajj, E.W. Rosenthal, H.M. Milchberg, K.Y. Kim
New J. Phys., 2013, **15**, 075002.
DOI: 10.1088/1367-2630/15/7/075002.
31. W. Rogowski, W. Steinhaus
Archiv für Elektrotechnik, 1912, **1**, 141. DOI: 10.1007/BF01656479.
32. I. Babushkin, S. Skupin, A. Husakou, C. Köhler, E. Cabrera-Granado, L. Bergé, J. Herrmann
New J. Phys., 2011, **13**, 123029.
DOI: 10.1088/1367-2630/13/12/123029.
33. A.A. Voronin, A.M. Zheltikov
Phys. Rev. A, 2020, **101**, 043813. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.043813.
34. C. D'Amico, A. Houard, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, A. Couairon, V.T. Tikhonchuk
Phys. Rev. Lett., 2007, **98**, 235002.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.235002.
35. C. D'Amico, A. Houard, S. Akturk, Y. Liu, M. Franco, B. Prade, A. Couairon, V. Tikhonchuk, A. Mysyrowicz
New J. Phys., 2007, **10**, 013015.
DOI: 10.1088/1367-2630/10/1/013015.