

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 669.74'71:538.958

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА Mn_3Z (Z=Al, Ga, Si, Sn)

© 2024 г. Е. И. Шредер^{a,*}, А. Д. Свяжин^a, В. В. Марченков^a

^aИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

*e-mail: shreder@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 15.07.2024 г.

После доработки 12.08.2024 г.

Принята к публикации 18.08.2024 г.

Представлены результаты экспериментального исследования оптических свойств сплавов Гейслера Mn_3Z (Z=Al, Ga, Si, Sn). Обнаружено аномальное для металлических систем поведение оптических характеристик сплавов в ИК-области спектра — отсутствие вклада от внутризонного поглощения и наличие интенсивного межзонного поглощения. Структура спектров оптической проводимости находит качественное объяснение на основе имеющихся первопринципных расчетов зонной структуры.

Ключевые слова: сплавы Гейслера, оптические свойства, электронная структура

DOI: 10.31857/S0015323024120081, **EDN:** IIХОИР

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы Гейслера с формулой X_2MnZ (full-Heusler alloys) либо $XMnZ$ (half-Heusler alloys) (здесь X, M — переходные металлы, Z — элемент III–V групп Периодической таблицы) являются объектами интенсивного исследования благодаря разнообразию структурных и магнитных свойств [1]. Как было показано в ряде перво-принципных расчетов, во многих сплавах Гейслера (СГ) реализуется состояние полуметаллического ферромагнетика, характеризующееся 100%-ной спиновой поляризацией электронов проводимости [2, 3]. Это делает данные материалы перспективными для применения в устройствах спиновой электроники. Сплавы Гейслера состава Mn_2MnZ (или Mn_3Z) выявляют ряд необычных физических свойств. В частности, в массивных образцах (β -Mn-структура) и пленках ($D0_3$ -структура) сплава Mn_3Al наблюдают температурную зависимость электросопротивления с отрицательным наклоном кривой $\rho(T)$ [4, 5]. В закаленном образце данного сплава со структурой β -Mn наблюдают участки с положительным и отрицательным наклоном кривой $\rho(T)$ [4], при этом остаточное сопротивление ρ_0 уменьшилось в несколько десятков раз по сравнению с медленно охлажденным образцом. Поведение $\rho(T)$ в соединении Mn_3Si совершенно типично для металлических сплавов [6]. Температурный

ход электросопротивления тонких пленок сплава Mn_3Ga существенно зависел от кристаллической структуры, и для кубической фазы имел полупроводниковый вид, а для тетрагональной фазы — металлический [7], при этом наблюдаемые величины ρ_0 были типичными для металлов. Сплав Mn_3Sn демонстрирует металлический характер $\rho(T)$ [8]. В сплаве были экспериментально обнаружены магнитные фермионы Вейля [8, 9, 10]. С их присутствием связано наличие ряда необычных свойств, а именно, магнитооптического эффекта Керра [11], аномального теплового [12] и топологического [13] эффекта Холла, а также аномального эффекта Нернста [14]. Сплав Mn_3Sn показывает большой гистерезис коэффициента переворота при изменении магнитного поля, что позволяет использовать его как эффективный поляризатор нейтронов [15].

В соответствии с результатами зонных расчетов, проведенных для кубической $D0_3$ -фазы, множество соединений Mn_3Z выявляют полную спиновую поляризацию носителей тока [16]. Так, Mn_3Al является полностью скомпенсированным ферримагнетиком с нулевой плотностью состояний на уровне Ферми в подзоне со спинами “вниз”. Сплавы Mn_3Si и Mn_3Sn являются полуметаллическими ферримагнетиками. Сплав Mn_3Ga не является полуметаллическим ферро- или ферримагнетиком. Расчеты для тетрагональной решетки данного сплава показы-

вают, что частичное замещение Mn практически любым металлом 3d-ряда в данном соединении приводит к существенному росту спиновой поляризации носителей заряда [17].

Спектроскопические (оптические) данные несут информацию об электронной структуре, параметрах носителей заряда. Тем самым являются надежной базой для проверки моделей электронного спектра. Оптическими методами электронные свойства сплава Mn_3Al были исследованы в работе [18]. Авторами были определены плазменная ω_p и релаксационная γ частоты электронов проводимости, а также их эффективная концентрация $N_{\text{эфф}}$. Следует отметить, что образец, исследованный в работе, был двухфазным.

Оптические свойства сплава Mn_3Sn как функция температуры были исследованы в работе [8], где оптическая проводимость рассчитана по соотношениям Крамерса–Кронига из измерений отражательной способности. В инфракрасной области спектра авторы наблюдали частотную дисперсию оптической проводимости, характерную для металлов. Были определены $N_{\text{эфф}}$, эффективная масса электронов проводимости m^* и $\omega_p(T)$, а характер дисперсии оптической проводимости $\sigma(\omega)$ подтверждал существование фермионов Вейля в данном сплаве. Насколько нам известно, в научной литературе нет сведений, как теоретических, так и экспериментальных, об исследовании оптических свойств сплавов Mn_3Ga и Mn_3Si .

Цель настоящей работы — исследование оптических свойств сплавов Mn_3Z ($Z=Al, Ga, Si, Sn$) и их эволюции при изменении Z -элемента, установление связи особенностей дисперсии оптических функций с электронной структурой.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объемные поликристаллические образцы сплавов Mn_3Z ($Z=Al, Ga, Si, Sn$) были синтезированы в индукционной печи в атмосфере очищенного аргона.

Приготовленные слитки отжигали в течение 72 ч при 650°C в атмосфере аргона с последующим охлаждением до комнатной температуры со скоростью ~ 100 град/ч. Рентгеноструктурные исследования порошковых образцов проведены при комнатной температуре на дифрактометре высокого разрешения Empyrean, в фильтрованном $\text{Cu}-\text{Ka}$ -излучении ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) в интервале углов 17° – 95° с шагом сканирования 0.02° . Первичную обработку, рентгенофазовый анализ, расчет параметров и заполнение узлов решетки проводили в пакете программ HighScore Plus. Результаты определения структурного состояния сплавов представлены в табл. 1. Отметим, что все сплавы кристаллизуются в разные типы структуры. В сплаве Mn_3Si присутствует незначительное количество второй фазы, которую не удалось идентифицировать из-за малого количества пиков на рентгенограмме. Наличие второй фазы обнаружено также в сплаве Mn_3Sn . Формирование разных типов структуры было показано теоретически в расчетах из первых принципов структурной стабильности и магнитных свойств кубической, тетрагональной и гексагональной фазы в сплавах Mn_3Z ($Z=Ga, Sn, Ge$) в работе [19], β -Mn фазы в Mn_3Al [20], ГЦК-структуре в Mn_3Si [21].

Зеркальные поверхности для оптических исследований получены шлифованием образцов на микропорошках карбida бора разной дисперсности и полированием на окиси хрома. Частотная зависимость действительной $\epsilon_1(\omega)$ и мнимой $\epsilon_2(\omega)$ части диэлектрической проницаемости (ω — циклическая частота световой волны) исследована эллипсометрическим методом Битти при комнатной температуре на воздухе в интервале спектра (0.08–5) эВ ($\lambda=(0.25–15) \text{ мкм}$). Точность измерений составляла 2–5% в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Значения статической проводимости при комнатной температуре получены стандартным четырехконтактным методом.

Таблица 1. Кристаллическая структура сплавов

Сплав	Фазовый состав, группа симметрии	Объемная доля фаз, вес. %	Параметр решетки, \AA
Mn_3Al	β -Mn ($P4_32$)	100	6.397
Mn_3Ga	ГЦК ($Fm-3m$)	100	3.795
Mn_3Si	ГЦК ($Fm-3m$)	95	5.725
	ГЦК	5	5.958
Mn_3Sn	Mn_3Sn $P63/mmc$	90	5.667/4.534
	Mn_2Sn $P63/mmc$	10	4.387/5.494

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральная зависимость действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 части диэлектрической проницаемости сплавов представлена на рис. 1. Наблюдается монотонное увеличение ϵ_2 с увеличением длины волны падающего света и отрицательные значения ϵ_1 вплоть до границы исследованного интервала. Такое поведение характерно для материалов с металлическим типом проводимости и обусловлено вкладом электронов на уровне Ферми. Однако абсолютные значения ϵ_1 и ϵ_2 низкие, что свидетельствует о существенном ослаблении металлических свойств сплавов. Из анализа частотной зависимости $\epsilon_1(\omega)$ и $\epsilon_2(\omega)$ в ИК-области спектра можно определить параметры электронов: ω_p^2 — квадрат плазменной частоты, пропорциональный эффективной концентрации свободных носителей; γ — частота релаксации, которая включает в себя все механизмы рассеяния электронов. Из зависимости $(1-\epsilon_1)^{-1}=f(\omega^2)$ на участках, где она описывается прямой линией, получены оценки квадрата плазменной частоты ω_p^2 : $\sim 0.4 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-2}$ для Mn_3Sn , $\sim 1.2 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-2}$ для Mn_3Al , $\sim 2.2 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-2}$ для Mn_3Si и Mn_3Ga . Эффективная концентрация свободных носителей $N_{\text{эфф}} = \omega_p^2 \cdot m / 4\pi e^2$ изменяется при этом в интервале $\sim (1-7) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что на 1–2 порядка меньше, чем в нормальных металлах. Для определения частоты релаксации необходимо, чтобы зависимость $\epsilon_2(\omega) = f(\epsilon_1)$ (диаграмма Арганда) имела прямолинейный участок в ИК-области спектра, где влияние межзонных переходов было бы минимальным. В нашем случае ни для одного сплава это условие не выполняется.

При анализе экспериментальных данных с целью выявления механизма, определяющего оп-

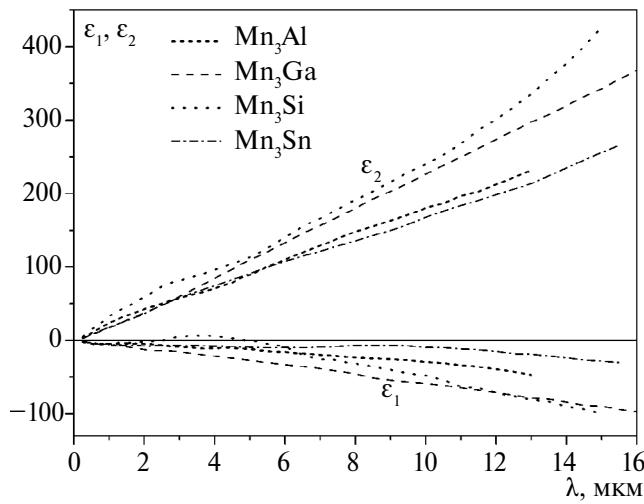


Рис. 1. Дисперсия действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 части диэлектрической проницаемости сплавов.

тические свойства металла в данном диапазоне спектра, используют оптическую проводимость $\sigma(\omega) = \epsilon_2 \cdot \omega / 4\pi$. В ИК-области спектра для металлов характерно наличие друлевского подъема на кривой $\sigma(\omega)$, обусловленного вкладом от поглощения энергии падающей волны свободными электронами (внутризонное поглощение) [22]. По мере увеличения частоты падающего света включается, а затем начинает доминировать механизм квантового возбуждения электронов. В оптической проводимости появляется вклад от межзонного поглощения, дающего информацию об электронном энергетическом спектре.

На всем исследованном участке спектра для всех исследованных сплавов доминирующую роль в формировании оптических свойств играют межзонные переходы, формируя сложную спектральную зависимость $\sigma(\omega)$ (рис. 2). Наиболее интенсивное межзонное поглощение отмечено в сплаве Mn_3Si , можно выделить “плечо” в области 0.11–0.2 эВ, а также пики при энергиях 0.5, 1.2 эВ. В видимой и УФ-области интенсивность межзонного поглощения постепенно снижается до уровня $\sigma(\omega) \sim 35 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. В сплаве Mn_3Al полоса межзонного поглощения имеет меньшую интенсивность, на кривой можно выделить пики при энергиях 0.16, 1.13, 2.1 эВ, затем наблюдается постепенное уменьшение до уровня $\sigma(\omega) \sim 25 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. В сплаве Mn_3Ga можно выделить “плечо” в области $E < 0.35$ эВ, по-видимому, на фоне слабого друлевского подъема “плечо” в области 0.43–0.8 эВ, слабый максимум при 1.5 эВ, далее идет бесструктурный спад до уровня $\sigma(\omega) \sim 15 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ в УФ-области. В сплаве Mn_3Sn в ИК-области следует выделить слабый максимум с центром около 0.5 эВ. В широкой области

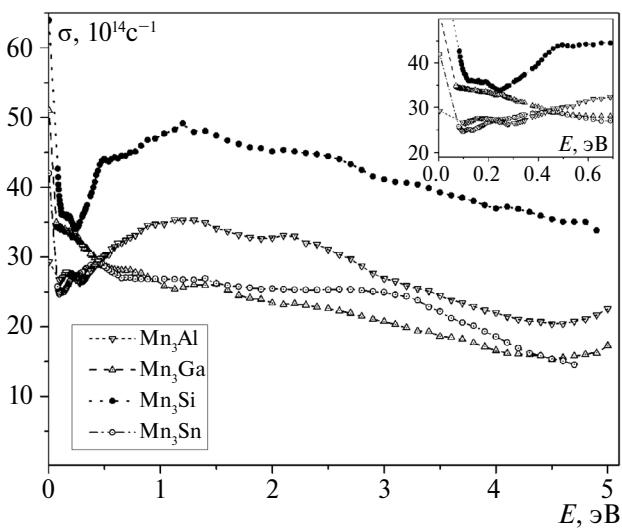


Рис. 2. Дисперсия оптической проводимости сплавов. На вставке — более подробно ИК-область.

энергий 0.65–3.0 эВ оптическая проводимость держится на уровне $(27\text{--}25)\cdot10^{14}\text{ с}^{-1}$ и затем снижается до $\sigma(\omega)\sim15\cdot10^{14}\text{ с}^{-1}$ в УФ-области.

Наличие друдевской составляющей оптической проводимости, пропорциональной $1/\omega^2$, в ИК-области спектра (вклад от внутризонного поглощения) отмечено только в сплаве Mn_3Si в области энергий $E<0.12$ эВ. Для остальных сплавов рост оптической проводимости только наметился на низкоэнергетическом крае исследованного интервала. Дисперсия диэлектрической проницаемости (рис. 1) свидетельствует о наличии вклада, обусловленного внутризонным поглощением. Однако этот вклад достаточно слабый и не проявился в дисперсии оптической проводимости.

В пределе $\omega\rightarrow 0$ оптическая проводимость $\sigma(\omega)$ выходит на значение статической проводимости при комнатной температуре, которая, однако, невысока для всех сплавов (точки на оси ординат на рис. 2). Очевидно, что при дальнейшем уменьшении энергии падающей световой волны ожидается рост оптической проводимости. Таким образом, имеется согласие оптических данных в ИК-области спектра и статической проводимости — более высоким значениям оптической проводимости для Mn_3Si соответствует более высокая статическая проводимость в сравнении с Mn_3Ga , Mn_3Al , Mn_3Sn .

Обсуждение экспериментальных результатов проведем на основе имеющихся в литературе первопринципных расчетов электронной структуры. Для сплава Mn_3Al с $\beta\text{-Mn}$ структурой показано, что уровень Ферми расположен в области высокой плотности $3d$ -состояний Mn в обеих спиновых подсистемах [18, 20]. По этой причине носители тока слабо участвуют в проводимости и формировании вклада от внутризонных переходов. Таким образом, оптические данные свидетельствуют о низкой эффективной концентрации носителей заряда. Выполненный в работе [18] расчет спектра оптической проводимости прогнозирует наличие значительного межзонного поглощения в области энергий ниже 1 эВ, что находится в хорошем согласии с экспериментальным спектром.

В сплаве Mn_3Ga уровень Ферми расположен в области высокой плотности состояний в одной спиновой подсистеме, и более низкой — в другой [17]. Исходя из такой картины плотности состояний, можно ожидать межзонные переходы практически с нулевой энергией. Низкая интенсивность межзонного поглощения во всей исследованной области может быть связана со слабой гибридизацией d -состояний Mn и p -состояний Ga.

Сплав Mn_3Si , по данным рентгеноструктурного анализа, имеет ГЦК-структуру. Согласно зонным расчетам, сплав является полуметаллическим антиферромагнетиком ниже $T_N=23$ К: уровень Ферми для одной из спиновых подсистем расположен в энергетической щели [23] или в области близкой к нулю [16] плотности состояний. Тот факт, что в сплаве Mn_3Si наблюдается наиболее интенсивная полоса межзонного поглощения (рис. 2) можно связать с более сильной гибридизацией d -состояний Mn и p -состояний Si, чем в сплавах с $Z\text{=Al, Ga, Sn}$.

Сплав Mn_3Sn кристаллизуется в гексагональную структуру. Литературные данные (см., напр. [8, 24]) свидетельствуют, что в зонном спектре сплава вблизи уровня Ферми имеются плоские зоны, что формирует высокую плотность состояний, и узлы Вейля. Можно выделить линейный участок на кривой оптической проводимости в диапазоне (0.138–0.214) эВ, который можно связать с проявлением узлов Вейля в зонном спектре. Полученные нами результаты находятся в согласии с данными, полученными в работе [8].

Во всех исследованных сплавах, имеющих разную кристаллическую структуру, выявлено наличие пиков поглощения в ИК-области спектра. Это свидетельствует о существовании низкоэнергетических щелей в их зонном спектре. Действительно, для всех изученных сплавов зонные расчеты показали, что уровень Ферми расположен в области высокой плотности состояний хотя бы для одной спиновой подсистемы. Это создает условия для межзонных переходов при низких энергиях.

Ранее подобное поведение $\sigma(\omega)$ — отсутствие друдевского подъема — неоднократно наблюдали для большой группы сплавов Гейслера, таких как Fe_2VAl , Co_2MnAl , Mn_2CrAl , Mn_2FeAl , которое связывали с наличием энергетической щели в зонном спектре в одной или обеих спиновых подсистемах [25, 26], либо, напротив, с положением уровня Ферми в области высокой плотности состояний [27, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование оптических свойств сплавов Mn_3Z , $Z\text{=Al, Ga, Si, Sn}$ выполнено эллипсометрическим методом Битти.

Анализ дисперсии действительной части диэлектрической проницаемости в ИК-области указывает на ослабление, по сравнению с нормальными металлами, проводящих свойств сплавов — получены низкие значения эффективной концентрации свободных носителей.

Анализ дисперсии оптической проводимости указывает на доминирующую роль межзонных

переходов в формировании оптических свойств, в том числе в ИК-области спектра. Вклад внутризонного поглощения в ИК-области достаточно слабый, проявился в дисперсии оптической проводимости только для сплава Mn₃Si.

Наличие пиков поглощения в ИК-области спектра свидетельствует о существовании низкоэнергетических щелей в зонном спектре исследованных сплавов. Имеющиеся в литературе картины зонного спектра позволяют дать качественное объяснение особенностей дисперсии оптической проводимости и диэлектрической проницаемости.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема “Электрон”, № 122021000039-4). Рентгеноструктурные данные получены с использованием оборудования ЦКП “Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов” ИФМ УрО РАН.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марченков В.В., Ирхин В.Ю. Полуметаллические ферромагнетики, спиновые бесщелевые полупроводники и топологические полуметаллы на основе сплавов Гейслера: теория и эксперимент // ФММ. 2021. Т. 122. № 12. С. 1221–1246.
2. De Groot R.A., Mueller F.M., Mueller P.G., van Engen P.G., Bushow K.H.J. New class of materials — half-metallic ferromagnets // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 2024–2027.
3. Katsnelson M.I., Irkhin V.Yu., Chioncel L., Lichtenstein A.I., De Groot R.A. Half-metallic ferromagnets: from band structure to many-body effects // Rev. Mod. Phys. 2008. V. 80(2). P. 315–378.
4. Марченков В.В., Ирхин В.Ю., Семянникова А.А., Коренистов П.С., Марченкова Е.Б. Электросопротивление, магнитные и гальваномагнитные свойства литого и быстрозакаленного сплава Гейслера Mn₃Al // ФММ. 2023. 124 № 4. С. 339–345.
5. Jamer M.E., Wang Y.J., Stephen G.M., McDonald I.J., Grutter A.J., Sterbinsky G.E., Arena D.A., Borchers J.A., Kirby B.J., Lewis L.H., Barbiellini B., Bansil A., and Heiman D. Compensated Ferrimagnetism in the Zero-Moment Heusler Alloy Mn₃Al // Phys. Rev. Appl. 2017. V. 7 (6). P. 064036. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.7.064036>
6. Pfeiderer C., Bœuf J., Löhneysen H.V. Stability of Antiferromagnetism at High Magnetic Fields in Mn₃Si // Phys. Rev. B. 2002. V. 65 (17). P. 172404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.172404>
7. Bang H.W., Yoo W., Kim C., Lee S., Gu J., Park Y., Lee K., Jung M.H. Structural, Magnetic, and Electrical Properties of Collinear Antiferromagnetic Heteroepitaxy Cubic Mn₃Ga Thin Films // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 115. (1). P. 012402. <https://doi.org/10.1063/1.5088790>
8. Cao L.Y., Xu Z.A., Gao B.X., Wang L., Zhang X.T., Zhang X.Y., Guo Y.F., Chen R.Y. Optical Study of Three-Dimensional Weyl Semimetal Mn₃Sn // Phys. Rev. B. 2023. V. 108 (23). P. 235109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.235109>
9. Kuroda K., Tomita T., Suzuki M.T., Bareille C., Nugroho A.A., Goswami P., Ochi M., Ikhlas M., Nakayama M., Akebi S., Noguchi R., Ishii R., Inami N., Ono K., Kumigashira H., Varykhalov A., Muro T., Koretsune T., Arita R., Shin S., Takeshi K., Nakatsuji S. Evidence for Magnetic Weyl Fermions in a Correlated Metal // Nature Mater. 2017. V. 16. P. 1090–1095. <https://doi.org/10.1038/NMAT4987>
10. Yang H., Sun Y., Zhang Y., Shi W.J., Parkin S.S.P., Yan B. Topological Weyl Semimetals in the Chiral Antiferromagnetic Materials Mn₃Ge and Mn₃Sn // New J. Phys. 2017. V. 19 (1). P. 015008. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa5487>
11. Higo T., Man H., Gopman D.B., Wu L., Koretsune T., Van 't Erve O.M.J., Kabanov Y.P., Rees D., Li Y., Suzuki M.T., Patankar S., Ikhlas M., Chien C.L., Arita R., Shull R.D., Orenstein J., Nakatsuji S. Large Magneto-Optical Kerr Effect and Imaging of Magnetic Octupole Domains in an Antiferromagnetic Metal // Nature Photonics. 2018. V. 12 (2). P. 73–78. <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0086-z>
12. Li X., Xu L., Ding L., Wang J., Shen M., Lu X., Zhu Z., Behnia K. Anomalous Nernst and Righi-Leduc Effects in Mn₃Sn: Berry Curvature and Entropy Flow // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119 (5). P. 056601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.056601>
13. Rout P.K., Madduri P.V.P., Manna S.K., Nayak A.K. Field-Induced Topological Hall Effect in the Non-coplanar Triangular Antiferromagnetic Geometry of Mn₃Sn // Phys. Rev. B. 2019. V. 99 (9). P. 094430. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.094430>
14. Ikhlas M., Tomita T., Koretsune T., Suzuki M.T., Nishio-Hamane D., Arita R., Otani Y., Nakatsuji S. Large Anomalous Nernst Effect at Room Temperature in a Chiral Antiferromagnet // Nature Phys. 2017. V. 13 (11). P. 1085–1090. <https://doi.org/10.1038/nphys4181>
15. Tomiyoshi S., Yamaguchi Y., Ito Y. A Mn₃Sn Neutron Polarizer // Phys. B: Condens. Matter. 1995. V. 213–214 (C). P. 932–934. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(95\)00326-5](https://doi.org/10.1016/0921-4526(95)00326-5)
16. Chinnadurai K., Natesan B. Influence of Main-Group Elements on Structural, Electronic, Magnetic and Half-Metallic Properties of DO₃-Type Mn₃Z (Z = Al, Ga, In, Si, Ge, Sn, P, As and Sb) Alloys — A DFT Study // Comput. Condens. Matter. 2024. V. 38. P. e00871. <https://doi.org/10.1016/j.cocom.2023. e00871>
17. Chadov S., D'Souza S.W., Wollmann L., Kiss J., Fecher G.H., Felser C. Chemical Disorder as an Engineering Tool for Spin Polarization in Mn₃Ga -Based Heusler Systems // Phys. Rev. B. 2015. V. 91 (9). P. 094203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.094203>
18. Князев Ю.В., Лукоянов А.В., Кузьмин Ю.И., Даши Ш., Патра А.К., Васундхара М. Электронная структура

- ра и спектральные характеристики соединения Mn_3Al // ФММ. 2021. Т. 122. № 10. С. 954–960.
19. *Zhang D., Yan B., Wu S.-C., Kübler J., Kreiner G., Parkin S.S.P. and Felser C.* First-principles study of the structural stability of cubic, tetragonal and hexagonal phases in Mn_3Z ($Z=Ga, Sn$ and Ge) Heusler compounds // J. Phys.: Condens. Matter. 2013. V. 25. P. 206006.
20. *Kostenko M.G., Lukyanov A.V.* Magnetic properties and electronic structure of $Mn-Al$ alloys in the β - Mn structure // JMMM. 2022. V. 542. P. 168600–168602.
21. *Hortamani M., Sandratskii L., Zahn P., Mertig I.* Physical origin of the incommensurate spin spiral structure in Mn_3Si // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 07E506.
22. *Соколов А.В.* Оптические свойства металлов. М.: Физ.-мат. лит., 1961. 464 с.
23. *Jeong T.* Magnetic properties of Mn_3Si from first-principles studies // Physica B: Condensed Matter. 2012. V. 407. P. 888–890.
24. *Tianye Yu, Rui Liu, Yiran Peng, Pengyu Zheng, Guangwei Wang, Xiaobo Ma, Zhihong Yuan, and Zhiping Yin.* Correlated electronic structure of the kagome metal Mn_3Sn // Phys. Rev. B. 2022. V. 106. P. 205103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.205103>
25. *Шредер Е.И., Свяжин А.Д., Махнев А.А.* Эволюция электронной структуры и оптических свойств сплавов Гейслера на основе железа // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119. № 5. С. 96–100.
26. *Шредер Е.И., Кириллова М.М., Дякина В.П.* Оптические, электрические свойства и электронные характеристики сплавов Co_2MnZ ($Z = Al, Ga, Si, Sn, Sb$) // ФММ. 1996. Т. 81. Вып. 4. С. 82–90.
27. *Шредер Е.И., Лукоянов А.В., Мухачев Р.Д., Филанович А.Н., Дац Ш., Патра А.К., Васундхара М.* Электронная структура и оптические свойства сплавов Гейслера $Mn_{2-x}Fe_{1+x}Al$ ($x = -0.5, 0, 0.5, 1$) // ФММ. 2023. Т. 124. № 3. С. 257–263.
28. *Шредер Е.И., Филанович А.Н., Чернов Е.Д., Лукоянов А.В., Марченков В.В., Сташкова Л.А.* Электронная структура, термоэлектрические и оптические свойства сплавов Гейслера Mn_2MeAl ($Me=Ti, V, Cr$) // ФММ. 2023. Т. 124. № 7. С. 608–615.

OPTICAL PROPERTIES OF HEUSLER ALLOYS Mn_3Z ($Z=Al, Ga, Si, Sn$)

E. I. Shreder^{1,*}, A. D. Svyazhin¹, and V. V. Marchenkov¹

¹*Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108 Russia*

*e-mail: shreder@imp.uran.ru

The paper presents the findings of an experimental investigation into the optical properties of Mn_3Z ($Z = Al, Ga, Si, Sn$) Heusler alloys. The behavior of the optical characteristics of the alloy in the IR region of the spectrum, anomalous for metallic systems, was revealed, specifically, the absence of contribution from intraband absorption and the presence of intense interband absorption. The structure of the optical conductivity spectra is explained qualitatively on the basis of the available first-principles calculations of the band structure.

Keywords: Heusler alloys, optical properties, electronic structure