С.Я. Прислопский¹, С.В. Гапоненко¹, Э. Монайко², В.В. Серженту³, И.М. Тигиняну² ¹ Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь ² Национальный центр исследования и тестирования материалов, Технический Университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова³ Институт прикладной физики АН Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

ВОЗМОЖНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОГЕРЕНТНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ А^ШВ^V

Введение

Эффект аномального обратного рассеяния видимого света для сильно поглощающего нанопористого материала был обнаружен в 2011 году при исследовании нанопористого фосфида индия [1]. Поз же, этот же эффект наблюдался и для наноструктурированного арсенида галлия. В этой работе мы обобщили и проанализировали эксприментальные данные, полученные для обоих материалов. Ярко выраженный эффект обратного рассеяния в нанопористых полупроводниковых соединениях типа А^ШВ^V В спектральной собственного поглощения области сильного с сохранением линейной поляризации рассматривается как когерентное обратное рассеяние.

1. Описание образцов

Методика изготовления образцов нанопористого InP подробно описана в [2]. Образцы нанопористого GaAs изготовлены методом электрохимического травления кристаллических подложек (100)ориентированного арсенида галлия n-типа толщиной 500 мкм с концентрацией свободных носителей 2·10¹⁸ см⁻³, поставляемых CrvsTec GmbH. Для получения пористых слоев подложки подверга лись анодному травлению в 500 мл 5%-ного раствора HCl (первая группа, образцы № 1-5) и 0,3 М водного раствора HNO₃ (вторая 6-8) при температуре 23°С, которая образцы № группа, поддерживалась при помощи термостата. Продолжительность анодного травления составляла 10 минут для всех образцов. После травления образцы погружали на 30 с в смесь HCl:H₃PO₄ с отношением 1:1 для удаления верхнего слоя нуклеации. Принимая разветвлённые поры сосредоточены BO внимание, что В приповерхностном слое, после завершения процесса образования



пор слой толщиной 2 мкм удалялся методом изотропного жидкостного травления с последующим отсоединением оставшейся пористой пленки от монокристаллической подложки. В результате образовывались пористые слои GaAs с равномерным распределением пор.

При нормальных условиях ширина запрещённой зоны InP равна 1,34 эВ (соответствует длине волны 925 нм), у GaAs её величина со- ставляет 1,42 эВ (соответствует длине волны 873 нм). При $\lambda = 532$ нм монокристаллический арсенид галлия имеет следующие оптические характеристики: n = 4, $\alpha = 6 \cdot 10^4$ см⁻¹ [3]. Оба параметра очень большие и близки к таковым у InP.

2. Экспериметнальная установка

Для проведения экспериментов был использован непрерывный неодимовый лазер мощностью 1 мВт и длиной волны генерации 532 нм. Рассеянное на поверхности образца лазерное излучение соби ралось с помощью оптического волокна и регистрировалось спектрометром (Solar TII), оснащённым высокочувствительной ПЗС матрицей (Princeton Instruments), охлаждаемой жидким азотом. При исследовании поляризационных характеристик в оптический тракт помещались поляризатор и анализатор. Для калибровки был использован рассеивающий белый эталон BN-R98-S5C (Gigahertz-Optik GmbH, Germany).

3. Результаты и их обсуждение

Образец монокристаллического GaAs показал типичное зеркаль ное френелевское отражение. Для каждой из двух групп образцов с различными условиями изготовления увеличение тока травления при водит к усилению световозвращающего эффекта. На рисунке 1 представлена индикатриса рассеяния образца №8 наноструктурированного арсенида галлия с ярко выраженным эффектом обратного рассеяния.



Рисунок 1 – Индикатриса рассеяния образца №8 нанопористого GaAs. Стрелкой показано направление падения лазерного излучения (40°)

Для эталона индикатриса рассеяния соответствует закону Ламберта. Когерентное обратное рассеяние для него должно наблюдаться при углах $<1^{\circ}$, однако наша экспериментальная установка не позволяет проводить такие измерения. Результаты исследования образцов нанопористого GaAs схожи с таковыми у образцов нанопористого InP, полученными нами ранее в работах [1, 2].

Для выявления причин возникновения обратного рассеяния мы исследовали поляризацию рассеянного излучения. Анализ получен ных данных показал, что для рассеянного назад излучения сохраняется преимущественная линейная поляризация, совпадающая с таковой у падающего на образец излучения. При этом степень поляризации для GaAs равна 72%, а для InP – 47%.

В полном соответствии с теорией белый рассеивающий эталон в таком же эксперименте полностью деполяризовал падающее на него линейно поляризованное лазерное излучение.

Очевидно, что появление эффекта обратного рассеяние в двух различных нанопористых полупроводниковых соединениях типа $A^{III}B^{V}$ и сохранение линейной поляризации не может быть Ранее случайным. сообщалось возникновении 0 световозвращающего эффекта на шероховатой границе раздела металл-вакуум [4]. Но в нашем случае нельзя использовать данную аналогию, поскольку у металлов, в отличии от полупроводников, именно отрицательная диэлектрическая проницаемость допускает плазмон-поляритонов. возбуждение поверхностных Также световозвращающий эффект был обнаружен для диэлектрических частиц («глория» [5]) и для их скоплений (эффект Зелигера или «оппозиционный эффект» в астрономии [6, 7]). Однако в этом случае размер частиц значительно превышает длину волны, а оппозиционный эффект исчезает при сильном поглощении.

Обнаруженные свойства указывают на возможность возникновения когерентного обратного рассеяния в нанопористых полупроводниках $A^{III}B^{V}$. Однако сильное поглощение исследуемых материалов подавляет многократное рассеяние. Мы предполагаем два пути возникновения когерентного обратного рассеяния. Первый путь – развитие в наименьших из возможных замкнутых контурах (минимальное возможное количество актов рассеяния).

Второй путь – развитие вследствие многократного рассеяния, которое становится возможным благодаря появлению продольных электромагнитных волн, так называемых «темных» мод [<u>8</u>]. Вкратце, темные моды возникают на многочисленных границах сред, имеют очень высокие волновые числа раздела И, соответственно, очень короткую длину волны, причем их энергия концентрируется главным образом в порах, а не в сильно по Для глощающих включениях. темных мод мнимая часть диэлектрической проницаемости (определяющая потери при поглощении) может быть на два порядка меньше, чем для поперечных Интерпретация «светлых» МОД. В терминах многократного рассеяния темных мод объясняет форму индикатрисы рассеяния, предпочтительные условия ДЛЯ возникновения обратного когерентного рассеяния для pполяризации в сравнении с s-поляризацией и сохранение линейной поляризации.

В экспериментах по исследованию когерентного обратного рассеяния диаграммы всегда симметричны с острым (<1°) конусом обратного рассеяния и стремятся к постоянному ненулевому значению для углов, далеких от угла падения [9, 10]. Однако в нашем случае свето возвращающий эффект наблюдается в широком угле и диаграммы рассеяния всегда асимметричны. Большой пространственный угол обратного рассеяния может быть вызван высоким поглощением среды [11, 12] либо дополнительным вкладом обычного некогерентного рассеяния с учетом поглощей анизотропной структуры.

Заключение

образом, в работе наблюдался Таким эффект обратного рассеяния на образцах GaAs, ранее обнаруженный при исследовании нанопористых образцов InP. В обоих случаях материалы характеризуются высокими показателями поглощения и преломления. В экспериментах как с фосфидом индия, так и с арсенидом галлия наблюдалась ярко выраженная линейная поляризация рассеянного назад излучения, совпадающая с таковой у падающего излучения, что свидетельствует о когерентном обратном рассеянии. Индикатрисы рассеяния обычно асимметричны, что объясняется вкладом некогерентного рассеяния анизотропной среде с потерями при наклонном падении В излучения.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника»

(1.2.02), при поддержке Высшего совета по науке и технологическому развитию Академии наук Молдовы (15.817.02.29А) и Фонда Александра фон Гумбольдта.

Литература

1. Anomalous retroreflection from strongly absorbing nanoporous semiconductors / S.Ya. Prislopski [et al.] // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36, № 16.

– P. 3227–3229.

2. Retroreflection of light from nanoporous InP: correlation with high absorption / S.Ya. Prislopski [et al.] // Appl. Phys. A. -2014. – Vol. 117,

№ 2. – P. 467–470.

3. Madelung, O. Semiconductors: Data Handbook / O. Madelung // Springer, 2004. – 961 p.

4. McGurn, A.R. Localization effects in the elastic scattering of light from a randomly rough surface / A.R. McGurn, A.A. Maradudin // JOSA B. – 1987. – Vol. 4, No 6. – P. 910–926.

5. Lenke, R. Comparison between "the Glory" and coherent backscattering of light in turbid media / R. Lenke, U. Mack, and G. Maret // J. Op- tics A: Pure and Applied Optics. -2002. - Vol. 4. - P. 309–314.

6. Hapke, B. The opposition effect of the Moon: the contribution of coherent backscatter / B. Hapke, R. M. Nelson, W. D. Smythe // Science. – 1993. – Vol. 260. – P. 509–511.

Hapke, B. The opposition effect of the Moon: Coherent backscatter and shadow hiding / B. Hapke, R. M. Nelson, W. D. Smythe // Icarus. – 1998. – Vol. 133. – P. 89–97.

7. Sergentu, V.V. Anomalous retroreflection from nanoporous materials as backscattering by 'dark' and 'bright' modes / V.V. Sergentu, S.Ya. Prislopski, E.V. Monaico, V.V. Ursaki, S.V. Gaponenko, I.M. Tiginyanu // J. Optics. – 2016. – Vol. 18. – P. 125008.

8. Van Albada, M.P. Observation of weak localization of light in a random medium / M.P. van Albada, A. Lagendijk // Phys. Rev. Lett. – 1985. – Vol. 55. – P. 2692–2695.

9. Wolf, P.E. Weak localization and coherent backscattering of pho- tons in disordered media / P.E. Wolf, G. Maret // Phys. Rev. Lett. – 1985. – Vol. 55. – P. 2696–2699.

10. Kaveh, M. Weak localization and light scattering from disordered solids / M. Kaveh, M. Rosenbluh, I. Edrei, I. Freund// Phys. Rev. Lett. – 1986. – Vol. 57. – P. 2049–2052.

11. Wolf, P.E. Optical coherent backscattering by random media: An experimental study / P.E. Wolf, G. Maret, E. Akkermans, R. Maynard // J. Phys. France. – 1988. – Vol. 49. – P. 63–75.

| | | | | KOPWHD |
|----------|--------|-----|-----------|--------|
| | | NMe | SN VIX | |
| | SPININ | | | |
| PERIOSIN | | | | |