

13.1;13.2

## Фотоэдс на поверхности сильнолегированного $p^+$ -GaAs с адсорбированными слоями цезия и кислорода

© В.С. Хорошилов<sup>1,2</sup>, Д.М. Казанцев<sup>1,2</sup>, С.А. Рожков<sup>1,2</sup>, В.Л. Альперович<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: alper\_v@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 августа 2023 г.

В окончательной редакции 15 сентября 2023 г.

Принято к публикации 15 сентября 2023 г.

Разработана новая методика измерения поверхностной фотоэдс, основанная на зависимости квантового выхода фотоэмиссии от величины изгиба зон. С помощью этой методики изучена эволюция фотоэдс в сильнолегированном  $p^+$ -GaAs ( $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) при адсорбции цезия и кислорода. Обнаружены обратимые изменения величины фотоэдс, которые качественно отличаются от наблюдавшихся ранее на слаболегированных образцах и объясняются вариациями скорости поверхностной рекомбинации при формировании и распаде двумерных цезиевых кластеров.

**Ключевые слова:** фотоэмиссия, поверхностная фотоэдс, GaAs, фотолюминесценция, отрицательное электронное сродство.

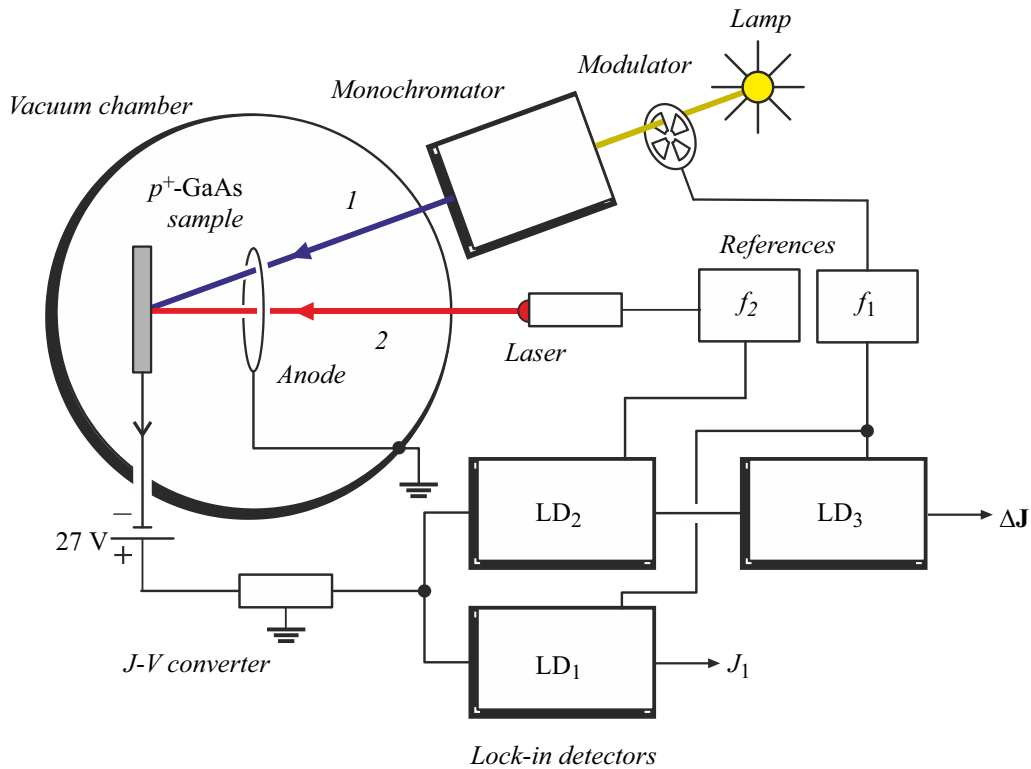
DOI: 10.61011/PJTF.2023.21.56460.19703

Известно, что адсорбция цезия и кислорода на поверхности сильнолегированного  $p^+$ -GaAs позволяет достичь состояния с эффективным отрицательным электронным сродством (ОЭС)  $\chi^* = \chi - \phi_S \approx -0.2 \text{ eV}$ , где  $\chi$  — истинное сродство,  $\phi_S$  — поверхностный изгиб зон. Это состояние обеспечивает высокий квантовый выход фотоэмиссии из  $p^+$ -GaAs(Cs,O)-фотокатодов [1]. Захват фотоэлектронов на поверхностные состояния приводит к возникновению фотоэдс  $V$ , т.е. уменьшению изгиба зон за счет частичной экранировки поверхностного электрического поля [2]. Фотоэдс увеличивает эффективное сродство  $\chi^*$  и, как следствие, уменьшает квантовый выход ОЭС-фотокатодов, в особенности при освещении мощными лазерными импульсами [3]. В связи с этим измерение фотоэдс на поверхности  $p^+$ -GaAs(Cs,O) представляет интерес для изучения влияния процессов поверхностного захвата и рекомбинации электронов на фотоэмиссию.

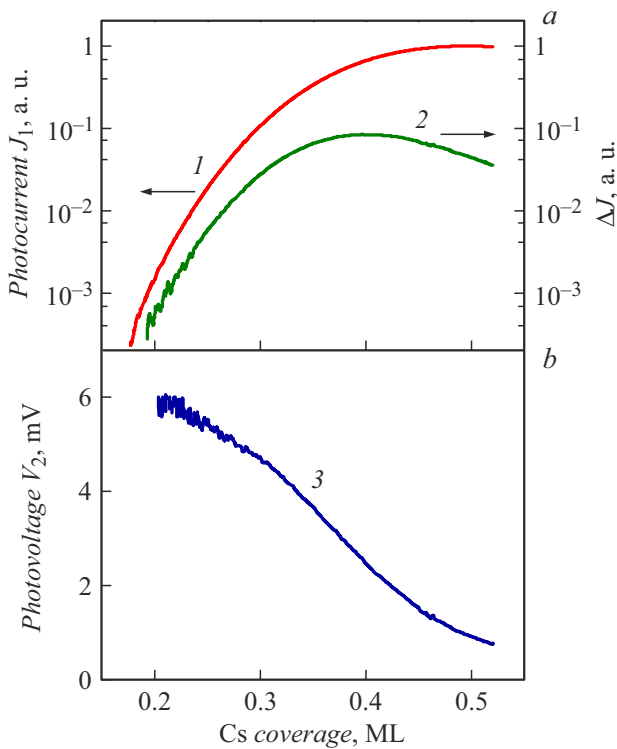
Ранее эволюция фотоэдс при адсорбции цезия и кислорода на поверхности  $p$ -GaAs изучалась методом спектроскопии фотоотражения на образцах с умеренным уровнем легирования ( $p \approx 1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) и на специальных UP<sup>+</sup>-структурах с тонким (30–100 nm) нелегированным поверхностным слоем [4,5]. Было показано, что при последовательном нанесении слоев Cs и O<sub>2</sub> адсорбция Cs приводит к увеличению величины фотоэдс  $V$ , а адсорбция O<sub>2</sub> — к ее уменьшению. Такое поведение было объяснено экспоненциальной зависимостью  $V(\phi_S)$  [6] и адатом-индуцированными вариациями изгиба зон: при нанесении Cs  $\phi_S$  увеличивается благодаря формированию и зарядке Cs-индуцированных поверхностных состояний, а при нанесении O<sub>2</sub> уменьшается из-за „пассивации“ этих состояний. На по-

верхности сильнолегированного  $p^+$ -GaAs(Cs,O) с характерным для ОЭС-фотокатодов уровнем легирования  $p \geq 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  спектроскопия фотоотражения оказалась неприменимой ввиду недостаточной чувствительности метода [6], поэтому вопрос об эволюции фотоэдс на такой поверхности при адсорбции цезия и кислорода оставался открытым. В настоящей работе для выяснения этого вопроса разработана новая, более чувствительная методика измерения фотоэдс, основанная на влиянии изгиба зон на квантовый выход фотоэмиссии. Обнаруженное с помощью этой методики поведение величины фотоэдс качественно отличается от наблюдавшегося ранее.

Эксперименты проводились на образцах  $p^+$ -GaAs(001), выращенных методом жидкофазной эпитаксии и легированных цинком до уровня  $p \approx 6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Атомарно-чистые Ga-обогащенные поверхности получались химическим удалением оксидов в атмосфере азота и прогревом в вакууме при температуре 760 K [7]. Нанесение Cs и O<sub>2</sub> и все измерения проводились при комнатной температуре ( $T = 295 \text{ K}$ ) в вакуумной камере с базовым давлением  $10^{-8} \text{ Pa}$  (рис. 1). Поверхность образца освещалась двумя пучками света 1 и 2 с одинаковой длиной волны  $\lambda_1 = \lambda_2 = 850 \text{ nm}$  и интенсивностями  $P_1 \approx 0.1 \text{ mW/cm}^2$  и  $P_2 \approx 1 \text{ mW/cm}^2$ , модулированными на частотах  $f_1 = 80 \text{ Hz}$  и  $f_2 = 1030 \text{ Hz}$ . Каждый пучок генерировал ток фотоэмиссии  $J_{1,2}$ , а также поверхностную фотоэдс  $V_{1,2}$ . Влияние фотоэдс на эффективное сродство  $\chi^*$  и, как следствие, на квантовый выход фотоэмиссии приводило к возникновению на суммарной и разностной частотах  $f_2 \pm f_1$  фотоэдс-индуцированного фототока  $\Delta J$ , амплитуда  $\Delta J$  и фаза  $\phi$  которого измерялись



**Рис. 1.** Схема установки. 1, 2 — пучки света, модулированные по интенсивности частотами  $f_{1,2}$ . Ток фотоэмиссии  $J_1$  и фотоэдс-индуцированный фототок  $\Delta J$  измеряются системой синхронных детекторов  $LD_{1-3}$ .



**Рис. 2.** Эволюция тока фотоэмиссии  $J_1$  (1), фотоэдс-индуцированного фототока  $\Delta J$  (2) и поверхностной фотоэдс  $V_2$  (3) при адсорбции цезия на чистой поверхности  $p^+$ -GaAs. Длина волны излучения равна 850 nm.

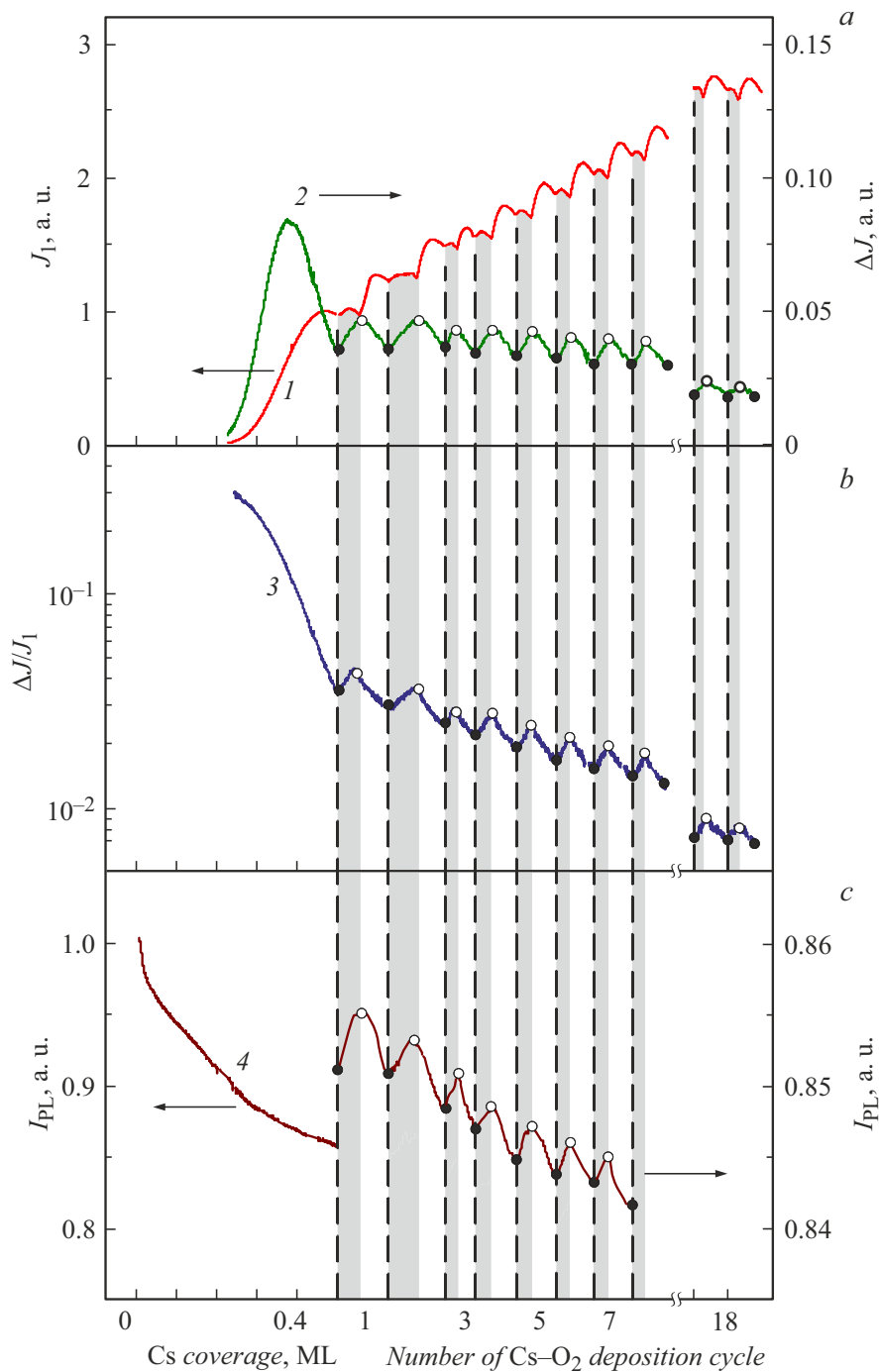
путем последовательного синхронного детектирования сигналов на частотах  $f_2$  и  $f_1$ .

Фототок  $\Delta J$  является суммой двух компонент, соответствующих взаимному влиянию пучков 1 и 2: модуляции тока фотоэмиссии  $J_1$  за счет фотоэдс  $V_2$  и модуляции  $J_2$  за счет  $V_1$ . Для расчета фотоэдс использовалась экспоненциальная зависимость квантового выхода  $Y$  от электронного сродства  $\chi^*$ , справедливая для фотонно-усиленной эмиссии термализованных электронов из  $p^+$ -GaAs с положительным электронным сродством (ПЭС) при  $\lambda_1 = \lambda_2 = 850$  nm [8]:  $Y \propto \exp(-\chi^*/kT)$ , где  $k$  — постоянная Больцмана. Предполагалось также, что фотоэдс мала ( $V_{1,2} \ll kT/e$ ,  $e$  — заряд электрона) и поэтому линейно зависит от интенсивности  $P_{1,2}$  [6]. В таком случае выбор одинаковых длин волн  $\lambda_1 = \lambda_2$  обеспечивал равенство эффектов взаимовлияния пучков 1 и 2, так как амплитуды этих эффектов пропорциональны произведениям  $J_1V_2$  и  $J_2V_1$ , каждое из которых определяется произведением интенсивностей  $P_1P_2$ . В результате фотоэдс  $V_2$  рассчитывалась по формуле

$$V_2 = \frac{kT}{e} \frac{\Delta J}{J_1} \frac{\pi}{4 \cos \varphi}. \quad (1)$$

Характерное время релаксации фотоэдс  $\tau$  определялось с помощью соотношения  $\tan 2\varphi = 2\pi f_2\tau$ .

На рис. 2, а показана зависимость тока фотоэмиссии  $J_1$  и фотоэдс-индуцированного фототока  $\Delta J$  от цезиевого покрытия  $\theta$  (в монослоях, ML) при адсорбции на



**Рис. 3.** Эволюция тока фотоэмиссии  $J_1$  (1), фотоэдс-индуцированного фототока  $\Delta J$  (2), их отношения  $\Delta J/J_1$  (3) и интенсивности фотолуминесценции  $I_{PL}$  (4) при нанесении цезия и кислорода на поверхность  $p^+$ -GaAs. Серым цветом выделены участки нанесения кислорода. Темным кружкам соответствуют моменты „включения“, а светлым — „выключения“ кислорода.

поверхности  $p^+$ -GaAs. Фототок  $J_1$  растет с увеличением  $\theta$  и, как известно, достигает максимального значения при  $\theta = 0.5$  ML, когда сродство  $\chi^*$  минимально [1,8]. Максимум  $\Delta J$  наблюдается при меньших  $\theta$  и определяется зависимостью  $V_2(\theta)$ . Величина фотоэдс  $V_2$  (рис. 2, b) рассчитывалась из отношения  $\Delta J/J_1$  по формуле (1). Видно, что  $V_2$  монотонно уменьшается с нанесением цезия. Во всем диапазоне  $\theta = 0.2-0.5$  ML фаза сигнала

$\Delta J$  составляла  $\varphi \approx 7^\circ$ , что соответствует времени релаксации фотоэдс  $\tau \approx 40 \mu s$ .

В дальнейшем, после достижения  $\theta = 0.5$  ML, нанесение цезия на поверхность продолжилось, и в дополнение к этому производилось периодическое нанесение кислорода [1,5] (рис. 3). Из рис. 3, a видно, что ток фотоэмиссии  $J_1$  в каждом цикле нанесения Cs и O<sub>2</sub> ведет себя немонотонно, но в целом возрастает благодаря

снижению эффективного электронного сродства до состояния с ОЭС [1]. Эволюция фотоздс-индуцированного фототока также немонотонна:  $\Delta J$  уменьшается после нанесения цезия и увеличивается после нанесения кислорода. В случае ОЭС воспользоваться формулой (1) для определения абсолютной величины фотоздс  $V_2$  нельзя, так как при переходе от ПЭС к ОЭС экспоненциальная зависимость  $Y(\chi^*)$  сменяется линейной [9]. Однако для малой фотоздс  $V_2 \ll kT/e$  отношение  $\Delta J/J_1$  остается пропорциональным величине  $V_2$ , поэтому эволюция  $\Delta J/J_1$ , показанная на рис. 3, *b*, отражает относительные вариации фотоздс. Видно, что фотоздс уменьшается после нанесения цезия и увеличивается после нанесения кислорода.

Такое поведение качественно отличается от ранее наблюдавшегося на образцах с умеренным уровнем легирования [4], а также на UP<sup>+</sup>-структурах [4,5], где максимум фотоздс наблюдался, наоборот, после нанесения цезия. Это различие может быть объяснено формированием двумерных металлических цезиевых кластеров на поверхности GaAs [10], которые приводят к увеличению скорости поверхностной рекомбинации и, как следствие, к уменьшению плотности фотоиндуцированного поверхностного заряда и величины фотоздс [2]. В свою очередь нанесение кислорода разрушает Cs-кластеры [10] и увеличивает фотоздс. Отметим, однако, что направление и амплитуда вариаций фотоздс зависели от предыстории поверхности  $p$ -GaAs(Cs,O). Приведенные на рис. 2 и 3 данные получены после многократных циклов нанесения и термодесорбции (Cs,O)-покрытия, причем фотоздс возрастала с номером цикла. Причины сложного поведения фотоздс остаются невыясненными и могут быть связаны с окислением поверхности GaAs или неполным термическим удалением (Cs,O)-слоев.

Изменения скорости поверхностной рекомбинации, вызванные формированием и разрушением Cs-кластеров, можно зарегистрировать с помощью измерения интенсивности фотолуминесценции  $I_{PL}$  [11]. На рис. 3, *c* показана эволюция  $I_{PL}$ , измеренная в отдельном эксперименте при освещении поверхности  $p^+$ -GaAs лазером с длиной волны 650 nm. Видно, что  $I_{PL}$  уменьшается при нанесении цезия, что свидетельствует о росте скорости поверхностной рекомбинации и качественно согласуется с приведенным объяснением. Отметим, что амплитуда вариаций  $I_{PL}$  ( $\sim 1\%$ ) существенно меньше, чем для  $\Delta J/J_1$  ( $\sim 25\%$ ), что, вероятно, обусловлено доминирующим влиянием объемной рекомбинации (по сравнению с поверхностной) на интенсивность фотолуминесценции.

Мы полагаем, что изменение направления обнаруженных вариаций фотоздс по отношению к наблюдавшимся ранее [4,5] вызвано наличием двух конкурирующих механизмов, определяющих величину фотоздс при адсорбции цезия и кислорода, а именно вариаций изгиба зон и скорости поверхностной рекомбинации. Вариации изгиба зон  $\Delta\phi_S$  зависят от уровня легирования через ширину области поверхностного поля  $w$ :  $\Delta\phi_S \propto w\Delta Q_S$ ,

где  $\Delta Q_S$  — адатом-индуцированное изменение заряда поверхности. При одинаковом  $\Delta Q_S$  величина  $\Delta\phi_S$  в образцах  $p^+$ -GaAs ( $p \approx 6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $w \approx 10 \text{ nm}$ ) в несколько раз меньше, чем в умеренно легированных ( $p \approx 1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $w \approx 60 \text{ nm}$ ) [4] и UP<sup>+</sup>-структурах ( $w \approx 30\text{--}100 \text{ nm}$ ) [5]. Поэтому на фоне ослабленных вариаций изгиба зон на поверхности  $p^+$ -GaAs доминирующее влияние на фотоздс может оказывать скорость поверхностной рекомбинации.

В заключение отметим, что с помощью новой методики, основанной на зависимости тока фотоэмиссии от изгиба зон, изучена эволюция фотоздс на поверхности сильнолегированного  $p^+$ -GaAs ( $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) при адсорбции цезия и кислорода. Обнаружены обратимые изменения фотоздс между малой величиной после адсорбции цезия и большой после адсорбции кислорода. Такие вариации фотоздс противоположны наблюдавшимся ранее на структурах с меньшим уровнем легирования и объясняются изменениями скорости поверхностной рекомбинации, предположительно связанными с формированием и распадом цезиевых кластеров.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30003 (<https://rscf.ru/project/23-72-30003/>).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Р.Л. Белл, *Эмиттеры с отрицательным электронным сродством* (Энергия, М., 1978), с. 84–102. [R.L. Bell, *Negative electron affinity devices* (Clarendon, Oxford, 1973), p. 65–76].
- [2] L. Kronik, Y. Shapira, *Surf. Sci. Rep.*, **37**, 1 (1999). DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00002-3
- [3] A. Herrera-Gómez, G. Vergara, W.E. Spicer, *J. Appl. Phys.*, **79**, 7318 (1996). DOI: 10.1063/1.361448
- [4] V.L. Alperovich, A.G. Paulish, A.S. Terekhov, *Phys. Rev. B*, **50**, 5480 (1994). DOI: 10.1103/PhysRevB.50.5480
- [5] V.L. Alperovich, A.G. Paulish, H.E. Scheibler, A.S. Terekhov, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 2122 (1995). DOI: 10.1063/1.113923
- [6] H. Shen, M. Dutta, *J. Appl. Phys.*, **78**, 2151 (1995). DOI: 10.1063/1.360131
- [7] O.E. Tereshchenko, V.L. Alperovich, A.G. Zhuravlev, A.S. Terekhov, D. Paget, *Phys. Rev. B*, **71**, 155315 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.71.155315
- [8] A.G. Zhuravlev, A.S. Romanov, V.L. Alperovich, *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 251602 (2014). DOI: 10.1063/1.4904986

- [9] L.B. Jones, H.E. Scheibler, S.N. Kosolobov, A.S. Terekhov, B.L. Milityn, T.C.Q. Noakes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54**, 205301 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/abe1e9
- [10] C. Laubschat, M. Prietsch, M. Domke, E. Weschke, E. Remmers, T. Mandel, E. Ortega, G. Kaindl, *Phys. Rev. Lett.*, **62**, 1306 (1989). DOI: 10.1103/PhysRevLett.62.1306
- [11] T. Kanata, M. Matsunaga, H. Takakura, Y. Hamakawa, T. Nishino, *J. Appl. Phys.*, **68**, 5309 (1990). DOI: 10.1063/1.347023