

# Влияние плотности лазерного возбуждения на характеристическую временную постоянную и величину среднеполевой электромультипликативной компоненты сигнала фотоотражения в области фундаментального перехода $E_0$

© Р.В. Кузьменко<sup>¶</sup>, А.В. Ганжа, Э.П. Домашевская, С. Хильдебрандт\*, Й. Шрайбер\*

Воронежский государственный университет (Физический факультет, Кафедра физики твердого тела),  
394693 Воронеж, Россия

\*Fachbereich Physik der Martin Luther Universität Halle-Wittenberg,  
06108 Halle/Saale, Deutschland

(Получена 12 марта 2001 г. Принята к печати 25 мая 2001 г.)

Исследуется влияние плотности лазерного возбуждения  $L$  на величину и характеристическую временную постоянную среднеполевой электромультипликативной компоненты спектров фотоотражения, измеряемых в области фундаментального перехода  $E_0$  прямозонного полупроводника. Серии измерений спектров проводились в области значений  $L = 100 \text{ мкВт/см}^2 - 1 \text{ Вт/см}^2$  на образцах GaAs с концентрацией носителей заряда  $n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для всех исследованных образцов обнаружена логарифмическая зависимость величины электромультипликативного сигнала от плотности лазерного возбуждения. Установлено, что наблюдаемое изменение характеристической временной постоянной не оказывает какого-либо заметного влияния на величину измеряемого сигнала.

Широкое применение спектроскопии фотоотражения (ФО) для исследования электронных, оптических и структурных свойств полупроводников обусловлено экспериментальной простотой реализации метода и разнообразием информации, содержащейся в спектре. Основным носителем информации в спектре является электромультипликативная компонента, возникающая в области прямого электронно-оптического перехода (валентная зона)–(зона проводимости) и измеряемая в среднеполевом или низкополевом режимах [1]. Модуляционный механизм, вызывающий ее появление, представляет собой периодическую модуляцию электрического поля поверхности полупроводника под действием лазерного освещения с энергией фотонов, большей ширины запрещенной зоны исследуемого полупроводника. В работах [2–4] было показано, что одним из основных параметров, определяющих форму спектральной линии и величину электромультипликативного сигнала, является уровень модуляции поверхностного электрического поля. Таким образом, плотность лазерного возбуждения (ПЛВ) является одним из важнейших параметров измерения спектров. Несмотря на это, влияние ПЛВ до сих пор было исследовано в литературе только для низкополевых компонент [5–7]. Кроме этого, практически ничего не сообщалось и о воздействии ПЛВ на характеристическую временную постоянную  $\tau$  компоненты, представляющую собой, в первом приближении, время запаздывания модулированного сигнала отражения по отношению к сигналу возбуждения [8,9].

Цель представленной работы — исследование влияния ПЛВ на величину и характеристическую временную постоянную среднеполевой электромультипли-

кативной компоненты в области фундаментального перехода  $E_0$ . Все измерения проводились при комнатной температуре на установке, устройство которой описано в [10]. Для проведения фазового анализа (ФА) спектров [9] использовался двухканальный фазочувствительный усилитель (ФЧУ) SR850. Измерения проводились на образцах GaAs ( $E_0 = 1.424 \text{ эВ}$  [4]) с концентрацией носителей заряда  $n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Значения ПЛВ (красный He-Ne-лазер) лежали в диапазоне  $L = 100 \text{ мкВт/см}^2 - 1 \text{ Вт/см}^2$ . Использование меньших значений ПЛВ делало сигнал настолько малым, что для его регистрации требовалось переключение диапазона усиления ФЧУ. Напротив, для ПЛВ, превышающей  $10 \text{ Вт/см}^2$ , для некоторых образцов наблюдалось насыщение величины и фазового угла сигнала ФО. Частота модуляции лежала в области значений  $f = 50 \text{ Гц} - 500 \text{ Гц}$ , что исключало ее влияние на измеряемую величину модуляционного сигнала.

Форма линии измеренных среднеполевых  $E_0$ -спектров ФО качественно совпадала с ранее опубликованной в литературе [4]. Однокомпонентность спектров доказывалась моделированием в рамках обобщенной многослойной модели (ОМСМ) [4] и построением фазовых диаграмм [9].

## Характеристическая временная постоянная

Величина сигнала ФО, измеряемого двухканальным ФЧУ, может быть определена как квадратный корень из суммы квадратов составляющей, синхронной с референтным сигналом, и составляющей, смещенной по отношению к референтному сигналу на  $90^\circ$  [9]. Однако

<sup>¶</sup> E-mail: roman@ftt.vsu.ru

она может и не совпадать с истинной величиной сигнала  $\Delta R/R(E)$ , определяемой параметрами модуляционного процесса. В [10] показывается, что величина комплексного сигнала ФО зависит от циклической частоты  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  — частота модуляции, и характеристической временной постоянной  $\tau$  компоненты и определяется как

$$\frac{\overline{\Delta R}}{R}(E, \omega, \tau) = \frac{\Delta R}{R}(E) \frac{1 + e^{-i\pi/\omega\tau}}{1 + \omega^2\tau^2} (1 + i\omega\tau). \quad (1)$$

Таким образом, для совпадения экспериментально измеряемого значения величины модуляционного сигнала с его истинной величиной необходимо выполнение условия  $\omega\tau \ll 1$ .

В рамках ФА оценка  $\tau$  из фазы запаздывания  $\varphi$  может быть проведена, основываясь на строго определенной временной форме сигнала  $\Delta R(t)$  под действием возмущения и после его выключения. Одна из наиболее часто цитируемых в литературе моделей для  $\Delta R(t)$  предложена Зеебауэром [8] и исходит из того, что уменьшение напряженности электрического поля при лазерном освещении происходит путем дрейфа и рекомбинации неосновных носителей заряда с основными носителями заряда, захваченными на поверхностные состояния ловушек. Поскольку генерация и дрейф неосновных носителей — очень быстрые процессы (область нс) при достаточно больших значениях плотностей неравновесных носителей заряда сколь-либо значительная временная задержка не должна наблюдаться. Напротив, восстановление поверхностного заряда после выключения лазерного возбуждения, происходящее путем захвата основных носителей заряда, характеризуется временными постоянными в области мкс–мс [11,12]. Это означает, что временная постоянная, описывающая изменение сигнала ФО после выключения возбуждения, не должна зависеть от ПЛВ. В модели в случае  $1/\omega\tau \rightarrow \infty$  ожидается  $\varphi \rightarrow 0$ ; в другом граничном случае ( $1/\omega\tau \rightarrow 0$ ) —  $\varphi \rightarrow 32.48^\circ$ .

В модели Шена и соавторов [13] предполагается, что модуляция электрического поля обусловлена взаимодействием поверхностных состояний с носителями заряда обоих знаков. Когда поверхностные состояния начинают терять свой заряд из-за рекомбинации с фотогенерированными неосновными носителями заряда, одновременно протекает конкурирующий процесс, заключающийся в захвате основных носителей заряда (так называемый "ток восстановления"). Время, за которое эти два процесса приходят в равновесие, и определяет  $\tau$ . Оно определяется емкостными эффектами в области пространственного заряда и для низких и средних уровней модуляции выражается следующим образом:

$$\tau = RC = \frac{dJ_{\text{res}}}{dV_s} C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d} \cdot \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{AT^2} \cdot \exp\left(\frac{qV_s}{kT}\right). \quad (2)$$

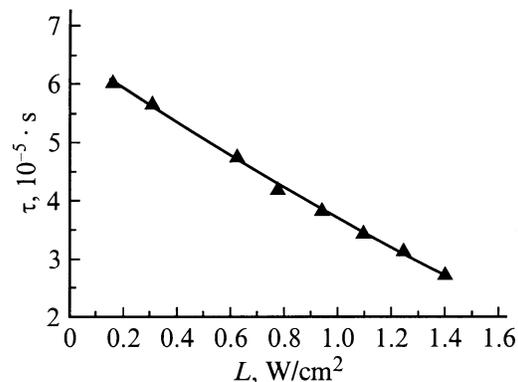
Здесь  $C$  — емкость системы 'поверхность–(область пространственного заряда)',  $R$  — ее сопротивление,  $J_{\text{res}}$  — плотность тока восстановления,  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная,  $q$  — элементарный заряд,  $d$  — толщина

слоя пространственного заряда,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $A$  — постоянная Ричардсона,  $V_s = V_{s,0} - V_p$ ,  $V_{s,0}$  — значение поверхностного потенциала при отсутствии освещения,  $V_p$  — фотонапряжение. Так как  $V_s$  через  $V_p$  зависит от ПЛВ, из (2) следует, что увеличение значения ПЛВ должно привести к спаду  $\tau$ . В предположении, что временные постоянные роста и спада одинаковы, для определения  $\tau$  нами в [9,10] было получено

$$\text{tg } \varphi = \omega\tau. \quad (3)$$

Для исследованных нами спектров при уменьшении значения ПЛВ наблюдалось уменьшение величины сигнала и вращение фазовой диаграммы по часовой стрелке. Вращение фазовой линии указывает на увеличение фазового угла. Поскольку измерения были проведены без предустановки фазы ФЧУ, фазовый угол  $\varphi$  мог быть определен как угол между фазовой линией и осью  $X$  [9]. Для образцов наблюдалось некоторое различие в значениях фазовых углов, однако оно составляло не более нескольких процентов. Хотя полученные значения  $\varphi$  и лежали в рамках модели Зеебауэра ( $\varphi = 5^\circ - 10^\circ$ ), их наблюдаемое изменение все же достаточно для того, чтобы показать, что эта модель в данном случае не может быть использована.

Для проверки использованного предположения об одинаковых значениях временных постоянных роста и спада при помощи осциллографа была измерена зависимость  $\Delta R(t)$  при фиксированной энергии фотона для одного из образцов. Хотя форма сигнала лишь немного отличалась от прямоугольной, тем не менее в области роста и спада было явно заметно запаздывание по отношению к сигналу возбуждения. Визуально рост и спад  $\Delta R(t)$  имели вид экспоненциальных функций с примерно одинаковыми временными постоянными. Это позволяет применить для расчета  $\tau$  формулу (3). Результат перерасчета  $\tau(L)$  для одной из типичных зависимостей  $\varphi(L)$  представлен на рис. 1. Как видно из рисунка, полученная зависимость  $\tau(L)$  может быть хорошо промоделирована прямой лини-



**Рис. 1.** Зависимость характеристической временной постоянной  $\tau$  электромульционной  $E_0$ -компоненты от плотности лазерного возбуждения  $L$ . Линейная зависимость наблюдается вплоть до  $L \lesssim 100$  мкВт/см<sup>2</sup> (на рисунке не показано).

ей. Поскольку фотонапряжение является логарифмической функцией от ПЛВ [5,6], из (2) ожидается линейная зависимость  $\tau(L)$ . Таким образом, полученный результат является дополнительным аргументом в пользу модели Шена.

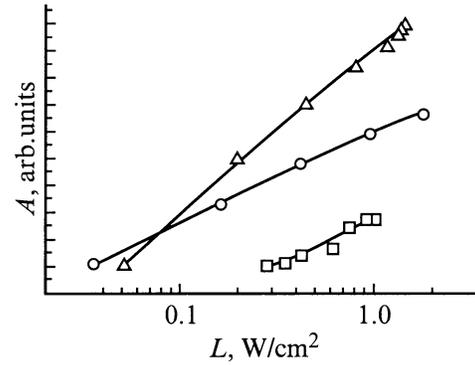
Поскольку полученные значения  $\tau$  лежат в области  $(3-6) \cdot 10^{-5}$  с, это в соответствии с (1) означает, что отличная от нуля характеристическая временная постоянная в диапазоне использованных значений ПЛВ тем не менее не оказывает заметного воздействия на величину измеряемого сигнала. Таким образом, измеряемая экспериментально величина электромульционного сигнала может быть проинтерпретирована как истинная величина, обусловленная только параметрами модуляционного процесса.

Для исключения влияния длины волны лазерного возбуждения была проведена серия измерений с синим He-Cd-лазером ( $\lambda = 441.6$  нм). При этом какого-либо качественного различия в наблюдаемых результатах обнаружено не было. Тем не менее при использовании синего лазера  $\tau$  принимали более низкие значения. Этот результат легко может быть объяснен сдвигом области генерации неравновесных носителей заряда к поверхности образца.

## Зависимость $A(L)$

Понятие амплитудного фактора  $A$  до сих пор было введено в литературе только в низкополевом случае, когда форма спектральной линии не зависит ни от значения напряженности электрического поля, ни от уровня его модуляции. В [5-7] показано, что в этом случае величина электромульционного сигнала является линейной функцией фотонапряжения или изменения поверхностного потенциала  $\Delta V_s$ . Поскольку при фотовозбуждении  $\Delta V_s$  является логарифмической функцией тока генерируемых неосновных носителей заряда к поверхности  $J_{pc}$  и "тока восстановления"  $J_{res}$ , а  $J_{pc}$  — линейная функция от  $L$ , отсюда непосредственно следует логарифмическая зависимость  $A(L)$ .

Для среднеполевой компоненты понятие амплитудного фактора может быть введено аналитически только в случае, если электрическое поле однородно во всей области возникновения сигнала ФО, и при освещении полупроводника достигается его полное подавление [14,15]. В этом случае амплитудный фактор мог бы быть определен как коэффициент пропорциональности между уширенной электрооптической  $G$ -функцией [15] и измеряемой спектральной линией. В [3,4] было показано, что для реальных объектов эти условия не выполняются, а спектральная форма компоненты не может быть описана одним аналитическим выражением. Тем не менее проведенные в рамках ОМСМ [4] расчеты показывают, что в области значений уровня модуляции электрического поля  $\xi > 0.05$  форма линии осцилляций



**Рис. 2.** Типичные зависимости величины сигнала фотоотражения  $A(L)$  от плотности лазерного возбуждения, обнаруженные на трех исследованных образцах.

Франца-Келдыша, их период и энергетическое положение остаются практически неизменными и определяются только значением электрического поля при отсутствии освещения и энергией электронно-оптического перехода. Напротив, величина сигнала в этой области определяется только уровнем модуляции поверхностного электрического поля. Таким образом, является правомерным использование величины осцилляций Франца-Келдыша в качестве амплитудного фактора среднеполевого электромульционного сигнала.

Определенные нами таким образом зависимости  $A(L)$  для нескольких образцов представлены на рис. 2. В качестве амплитудного фактора использовалась величина второй положительной осцилляции Франца-Келдыша. Значения амплитудных факторов для одного и того же значения ПЛВ значительно отличались от образца к образцу. Поэтому для сопоставления результатов измерений нами была предпринята нормировка. Проведенный количественный анализ показывает, что все наблюдаемые зависимости  $A(L)$  могут быть хорошо описаны логарифмической функцией. Благодаря этому можно сделать вывод о том, что в диапазоне использованных значений ПЛВ амплитудный фактор среднеполевого электромульционного сигнала является линейной функцией фотонапряжения или изменения поверхностного потенциала  $\Delta V_s$ .

В заключение отметим, что целью работы было исследование влияния ПЛВ на характеристическую временную постоянную  $\tau$  и величину среднеполевой электромульционной компоненты. Обнаружено, что изменение ПЛВ в диапазоне значений  $L = 100$  мкВт/см<sup>2</sup>–1 Вт/см<sup>2</sup> приводит к изменению  $\tau$ . Однако это не оказывает заметного влияния на величину измеряемого сигнала. Путем анализа экспериментальных данных и проведения расчетов в рамках ОМСМ введено понятие амплитудного фактора для среднеполевой компоненты, а также предложен метод его определения. Для исследованных образцов была обнаружена логарифмическая зависимость  $A(L)$ . Путем сравнения получен-

ного результата с литературными данными показано, что амплитудный фактор среднеполевого электро модуляционного сигнала является линейной функцией фотонапряжения. Благодаря проведенным исследованиям может быть сделан вывод о том, что установлена типичная реакция среднеполевой компоненты на изменение ПЛВ в относительно широком диапазоне значений  $L$ .

## Список литературы

- [1] D.E. Aspnes. Surf. Sci., **37**, 418 (1973).
- [2] H. Shen, M. Dutta. J. Appl. Phys., **78**, 2151 (1995).
- [3] J.P. Estrera, W.M. Duncan, R. Glosser. Phys. Rev. B, **49**, 7281 (1994).
- [4] Р. Кузьменко, А. Ганжа, Э.П. Домашевская, В. Кирхер, Ш. Хильдебрандт. ФТП, **34**, 1086 (2000).
- [5] R. Ditchfield, D. Llera-Rodriguez, E.G. Seebauer. Phys. Rev. B, **61**, 13 710 (2000).
- [6] E.R. Wagner, A. Manselis. Phys. Rev. B, **50**, 14 228 (1994).
- [7] H. Shen, S.H. Pan, Z. Hang, J. Leng, F.H. Pollak, J.M. Woodall, R.N. Sacks. Appl. Phys. Lett., **53**, 1080 (1988).
- [8] E.G. Seebauer. J. Appl. Phys., **66**, 4963 (1989).
- [9] А.В. Ганжа, В. Кирхер, Р.В. Кузьменко, Й. Шрайбер, С. Хильдебрандт. ФТП, **32**, 272 (1998).
- [10] S. Hildebrandt, M. Murtagh, R. Kusmenko, W. Kircher, G.M. Crean, J. Schreiber. Phys. St. Sol. (a), **152**, 147 (1995).
- [11] P.M. Pires, P.L. Souza, J.P. von der Weid. Appl. Phys. Lett., **65**, 88 (1994).
- [12] T. Kanata, M. Matsugana, T. Takakura, Y. Hamakawa. J. Appl. Phys., **69**, 3691 (1991).
- [13] H. Shen, M. Dutta, R. Lux, W. Buchwald, L. Fotiadis, R.N. Sacks. Appl. Phys. Lett., **59**, 321 (1991).
- [14] D.E. Aspnes. Phys. Rev., **147**, 554 (1966).
- [15] D.E. Aspnes. Phys. Rev., **153**, 972 (1967).

Редактор Л.В. Беляков

## Influence of laser pump density on the characteristic time constant and the intensity of the intermediate-field electromodulation $E_0$ -component of the photorefectance signal

R.V. Kusmenko, A.V. Ganzha, E.P. Domashevskaya, S. Hildebrandt\*, J. Schreiber\*

Solid State Physics Department,  
Voronezh State University,  
394038 Voronezh, Russia

\*Fachbereich Physik der Martin Luther Universität  
Halle-Wittenberg,  
06108 Halle / Saale, Deutschland

**Abstract** The influence of the laser pump density  $L$  on the intensity and the characteristic time constant of the field average electromodulation  $E_0$ -component of the photorefectance signal has been investigated. Measurements of the photorefectance spectra were carried out in the region of  $L = 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2 - 1 \text{W}/\text{cm}^2$  on GaAs samples with doping concentration about  $n \sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$ . For all samples investigated the logarithmic dependence of electromodulation signal intensity on the laser pump density was established. It has been determined that the attendant changes of the characteristic time constant has no detectable effect on the intensity of the signal measured.