

Анализ поляризационно-модуляционных спектров индуцированного одноосным сжатием фотоплеохроизма в кристалле Ge

© И.Е. Матяш, Б.К. Сердега [¶]

Институт физики полупроводников им. В. Лашкарева Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

(Получена 13 октября 2003 г. Принята к печати 27 ноября 2003 г.)

В образцах кристаллического германия, анизотропия проводимости в которых создана одноосной деформацией сжатия, исследована фотопроводимость с применением поляризационной модуляции излучения. Полученные этим методом спектральные характеристики представляют зависящие от энергии разности величин фотопроводимостей, возбужденных линейно поляризованным светом с периодически изменяющимися в пространстве поляризациями по отношению к оптической оси кристалла. В результате феноменологического анализа спектральных характеристик фотоплеохроизма установлено, что она состоит из 3 сомножителей. Показано, что с помощью дополнительного измерения производной фотопроводимости или проведения математической обработки характеристики становится возможным ее разложение на сомножители. Проведение процедуры по одной из этих методик позволило определить величину анизотропии коэффициента поглощения и ее спектральную характеристику.

1. Как следует из результатов предыдущих исследований, использование метода поляризационной модуляции (ПМ) излучения при измерении таких поляризационных эффектов, как фотоупругость [1] и линейный дихроизм [2], позволяет не только повысить обнаружительную способность метода по отношению к величине анизотропии диэлектрических свойств, но и расширить его информационную способность. Так, на примере исследования в кристаллах кремния методом ПМ линейного дихроизма, вызванного одноосным сжатием, показано, что дифференциальные спектры пропускания обладают тонкой структурой, которая отражает участие не только оптических, но и акустических фононов в межзонных переходах с поглощением света. При анализе этих характеристик обнаружено, что они состоят из нескольких сомножителей. Показано, что разложение характеристик на сомножители возможно только с помощью дополнительного измерения или путем проведения математической обработки. Одним из этих сомножителей является величина дихроизма, т.е. анизотропия поглощения, которая, как реакция вещества на внешнее воздействие, может представляться объектом исследования.

Расширение области применения ПМ спектроскопии на такие фотоэлектрические явления, как фотопроводимость, вентильная фотоэдс или другие фотовольтаические эффекты, представляется целесообразным не только ради накопления статистических сведений о природе анизотропии. Процедура перенесения метода ПМ с исследования оптических эффектов, где она продемонстрировала свою плодотворность, на получение экспериментальных результатов в области фотоэлектрических явлений не является тривиальной в силу различающейся природы этих явлений. В свою очередь это обстоятельство неизбежно проявится также в том, что анализ результатов измерения фотоплеохроизма методикой ПМ будет иметь свои особенности, без

установления которых не представляется достоверной их окончательная интерпретация. Учитывая, что в спектральной характеристике дихроизма есть компонента, связанная с коэффициентом поглощения [2], можно и в характеристиках эффекта фотоплеохроизма, который, как и дихроизм, обусловлен анизотропией диэлектрических свойств, ожидать проявления особенностей зонного энергетического спектра.

Изложенное предположение базируется на совокупности многочисленных результатов по исследованию плеохроизма в естественно анизотропных кристаллах как в оптическом явлении поглощения [3], так и в различных фотоэлектрических эффектах (фотопроводимость [4], барьерная фотоэдс [5]). Приведенные в этих и многих других публикациях спектральные характеристики имеют сложную структуру, которая отражает особенности дисперсии энергетических зон.

Приведем еще один аргумент в пользу целесообразности исследования плеохроизма в фотопроводимости. Как известно, измерение характеристик дихроизма производится посредством регистрации величины пропускания излучения, прошедшего сквозь образец конечной толщины. Условие полупрозрачности, в окрестности которого проявляется эффект дихроизма, ограничивает диапазон исследуемого спектра. Поэтому при необходимости продвижения в область более высоких энергий приходится, с учетом возрастания коэффициента поглощения, использовать все более тонкий образец. Но, как упоминается в работе [6], в случае фотопроводимости величина диффузионной длины неравновесных носителей заряда эквивалентна роли толщины образца при исследовании дихроизма. Поэтому при использовании материала с малым значением диффузионной длины станет возможным обойти то обстоятельство, которое заключено в проблематичности одноосного сжатия тонких образцов.

2. Наиболее подходящим по ряду обстоятельств материалом для наблюдения явления фотоплеохроизма пред-

[¶] E-mail: serdega@isp.kiev.ua

ставляется кристалл германия, в котором анизотропия электропроводности создается одноосной деформацией. Прежде всего большие времена жизни генерированных светом носителей заряда, свойственные не сильно легированным кристаллам, расширяют возможности выбора этого материала с точки зрения получения хорошо измеримого сигнала при использовании обычных источников света. Не последним обстоятельством является простота лабораторной технологии создания омических и механически прочных контактов к кристаллам Ge. Кроме того, возможность получения значений скорости поверхностной рекомбинации в диапазоне практически от 0 и до максимальных величин 10^4 см/с при отсутствии барьеров на поверхности является решающим аргументом в пользу этого материала.

Для измерений мы использовали образцы, вырезанные из слитка слабо легированного n -Ge ($\rho = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 300 К), с размерами освещаемой поверхности 4×10 мм и толщиной $d = 1$ мм. Поскольку исследуемый эффект, как и эффект линейного дихроизма, носит тензорный характер, представлялось бы необходимым учитывать кристаллографическую ориентацию образца. Однако в данном случае ориентационная зависимость эффекта фотоплекроизма не является принципиальной, тем более что, как показано на примере линейного дихроизма, она не является определяющей. Поэтому использовались образцы единственной ориентации, при которой освещаемая поверхность совпадала с плоскостью (100), а направления сжимающего усилия — с направлением [100].

Приготовление образцов происходило по стандартной процедуре, включающей механическую и химическую полировки. Отметим только, что для поляризационных исследований необходимо строгое соблюдение одного из условий обработки освещаемой поверхности образца. Оно связано с тем, что при периодическом изменении состояния поляризации излучения возможна модуляция условиями Френеля интенсивности той его части, которая проходит переднюю грань образца. Поэтому освещаемая поверхность должна быть геометрически плоской, а ее ориентация по отношению к направлению освещения перпендикулярной. В этом случае с учетом качественной юстировки элементов оптической системы отпадает необходимость в использовании компенсационной пластинки, применяемой обычно в таких случаях [7].

Одноосная деформация образцов осуществлялась в устройстве, которое обеспечивало однородное по их сечению значение механического напряжения. Полупроводниковый датчик преобразовывал величину сжимающего усилия в электрический сигнал для последующего использования при регистрации результатов измерений.

Измерение фотоплекроизма проводилось методикой ПМ, детали которой изложены в работе [2]. Здесь отметим только, что в ее основе использован фотоупругий модулятор излучения [8]. Он представляет собой динамическую четвертьволновую фазовую пластинку. В случае знакопеременной одноосной деформации

пластинки циркулярно поляризованный свет, падающий на нее, становится линейно поляризованным на выходе. Причем направление электрической компоненты волны периодически с частотой 50 кГц изменяется от параллельного до перпендикулярного по отношению к оптической оси образца (направлению деформации). Регистрировалась величина сигнала ΔF , пропорциональная разности значений фотопроводимостей $F_{\perp} - F_{\parallel}$ при освещении светом с ортогональными поляризациями, в зависимости от энергии квантов, величин деформации и скорости поверхностной рекомбинации. По обычной методике измерялись спектры фотопроводимости, использовавшиеся в дальнейшем при анализе результатов. Измерения проводились при комнатной температуре и интенсивности света из диапазона линейной зависимости фотопроводимости от уровня возбуждения, что позволяло пересчетом нормировать результаты измерений на постоянную интенсивность в использованном спектральном диапазоне.

3. Отметим, что зависимость фотопроводимости от коэффициента поглощения света α в исследуемых образцах в случае изотропной проводимости удовлетворительно описывается уравнением [9]

$$F(\alpha) = \frac{e\mu_n}{d} I_0 \tau \frac{\alpha}{1 - (\alpha L)^2} \times \left\{ \frac{1 - \exp(-\alpha d)}{\alpha L} - \frac{L(1 + \alpha L_s)}{L + L_s} [1 - \exp(-d/L)] \right\}, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на образец, μ_n — подвижность электронов, τ — время рекомбинации носителей, L — диффузионная длина, $L^2 = D\tau$, D — биполярный коэффициент диффузии, который в нашем случае при $n \gg p$ равен коэффициенту диффузии дырок; $L_s = D/s$ — длина рекомбинации и s — скорость поверхностной рекомбинации. Семейство характеристик, рассчитанных согласно уравнению (1), приведено на рис. 1 в зависимости от параметров α и s , определяющих эволюцию зависимостей. Значение L для данного конкретного случая получено из измерений фотомагнитного эффекта.

Нетрудно видеть, что экспериментальные характеристики фотопроводимости, приведенные на рис. 2, a , находятся в удовлетворительном согласии с таковыми, полученными расчетом из уравнения (1) и приведенными на рис. 1. Согласие могло бы быть более полным, если бы экспериментальные кривые представить в виде функции коэффициента поглощения, что возможно при использовании типичной для кристалла германия зависимости коэффициента поглощения от энергии квантов. Однако достаточно того, что экспериментальные значения фотопроводимости на рис. 2, a укладываются в диапазон изменения параметров рис. 1. Как будет видно в дальнейшем, единообразие в способах изображения результатов измерения является необходимым для их анализа.

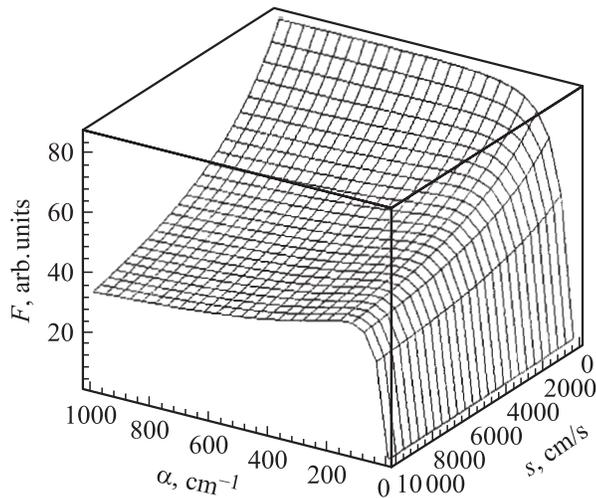


Рис. 1. Семейство зависимостей фотопроводимости F образца Ge, рассчитанных по формуле (1), от величин скорости поверхностной рекомбинации s и коэффициента поглощения α . В расчете использованы значения: $L = 1$ мм, $d = 2$ мм, $D = 50$ см²/с.

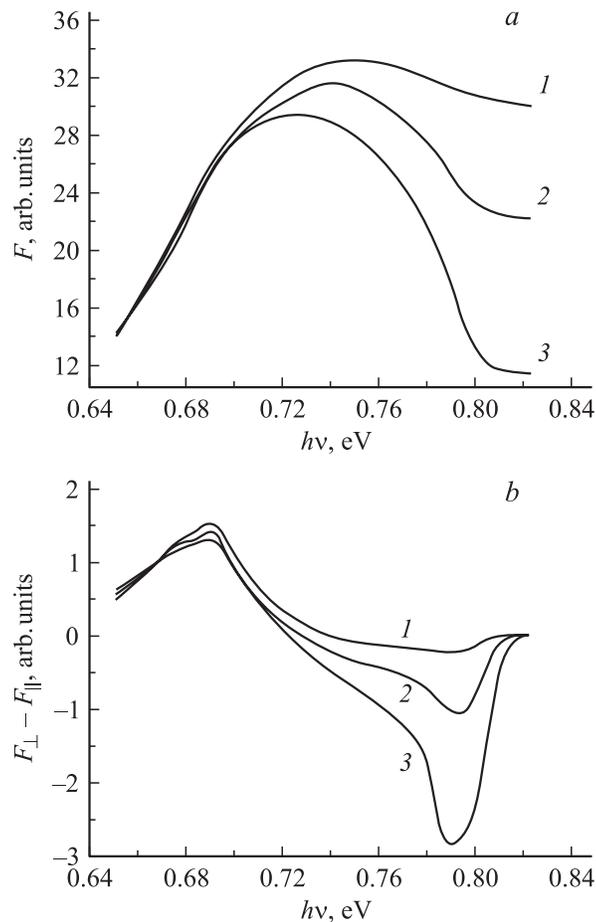


Рис. 2. Экспериментальные спектральные характеристики фотопроводимости F (а) и фотоплеохроизма ΔF (б) образца Ge, деформированного механическим напряжением 3 кбар при значениях скорости поверхностной рекомбинации s , см/с: 1 — 10^2 , 2 — 10^3 , 3 — 10^4 .

При одноосной деформации образца кубической системы, к которой принадлежит кристалл германия, вследствие расщепления уровней энергии, определяющих зону проводимости и (или) валентную зону, комплексный показатель преломления становится анизотропным. Следовательно, и коэффициент поглощения принимает 2 значения α_{\perp} и α_{\parallel} , соответствующие двум ориентациям электрической компоненты волны относительно осей оптической индикатрисы, описывающей диэлектрические свойства образца. При подстановке этих значений по отдельности в уравнение (1) получаем 2 зависимости, разница между которыми является той величиной, которая измеряется методом ПМ и, по сути, является спектральной характеристикой фотоплеохроизма.

Отметим, что в соответствии с общепринятой терминологией под плеохроизмом понимают величину, определяемую соотношением

$$k = \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{F_{\perp} + F_{\parallel}}, \quad (2)$$

где F_{\perp} и F_{\parallel} — значения фотопроводимостей, измеренные при перпендикулярной и параллельной ориентации электрического поля волны по отношению к оптической оси. Удобность выражения (2) состоит исключительно в его иллюстративной способности характеризовать относительную величину анизотропии, так как физическая причина анизотропии, а также ее абсолютное значение заключено в числителе этого выражения. Именно из анализа выражения в числителе, которое является поляризационной разностью фотопроводимостей, следует, как будет показано в дальнейшем, представляющая интерес информация о природе анизотропии и ее свойствах. Поэтому ни в коей мере не претендуя на исправление терминологии, а исключительно ради краткости будем понимать в данной работе под фотоплеохроизмом выражение в числителе (2). Тем более что, как следует из приведенных кривых на рис. 3, нового смысла в выражении (2) по крайней мере в нашем случае не содержится.

На рис. 2, б приведены экспериментальные зависимости $\Delta F = F_{\perp} - F_{\parallel}$ в диапазоне краевого поглощения германия для 3 случаев, отличающихся величиной скорости поверхностной рекомбинации s . Видно, как сильно влияет величина скорости поверхностной рекомбинации на ту часть характеристик плеохроизма, которая связана со спадом фотопроводимости на рис. 2, а в области повышенного коэффициента поглощения.

Сопоставление зависимостей, приведенных на рис. 2, а, б, позволяет сделать вывод, что полученный с помощью метода ПМ результат практически не отличается от производной фотопроводимости, измеряемой методом дифференциальной спектроскопии, называемым λ -модуляцией [10]. Чтобы убедиться в этом, было проделано графическое дифференцирование одной из кривых рис. 2, а. Полученный результат приведен на

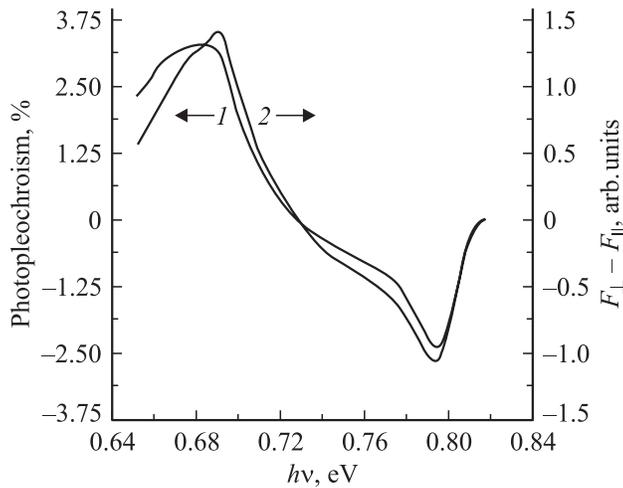


Рис. 3. Спектральные зависимости фотоплеохроизма (1) и поляризационной разности фотопроводимостей (2) при $s = 10^3$ см/с и механическом напряжении 3 кбар.

рис. 4 в сравнении с характеристикой фотоплеохроизма того же образца.

Результаты рис. 2, полученные методом ПМ, обязаны своим происхождением исключительно анизотропии диэлектрических свойств исследуемого образца, вызванной деформацией. Это утверждение иллюстрируется рис. 5, где приведены характеристики фотоплеохроизма, измеренные при различных значениях деформирующего усилия и одном и том же значении величины скорости поверхностной рекомбинации. Из рисунка видно, что амплитудные значения фотоплеохроизма, причем как положительного, так и отрицательного знака, находятся в линейной зависимости от величины деформирующего усилия по крайней мере в пределах используемых величин деформации.

Воспользуемся предпринятой в работе [11] процедурой анализа результатов метода ПМ. Напомним, что измеряемая величина в этом случае есть разность фотопроводимостей $\Delta F = F(\alpha_{\perp}) - F(\alpha_{\parallel})$. Поскольку $\Delta\alpha = \alpha_{\perp} - \alpha_{\parallel}$, то $\Delta F = F(\Delta\alpha + \alpha_{\parallel}) - F(\alpha_{\parallel})$. Используя определение производной, это выражение, при условии $\Delta\alpha \ll \alpha_{\perp}, \alpha_{\parallel}$ преобразуется к виду

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta\alpha. \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что ПМ в отличие от λ -модуляции дает характеристику производной фотопроводимости по коэффициенту поглощения. Но физическая причина особенностей спектров фотоплеохроизма содержится в зависимости коэффициента поглощения света от энергии квантов $\alpha(h\nu)$. Производная сложной функции (3) при разложении на частные производные показывает, что

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial(h\nu)} \frac{\partial(h\nu)}{\partial\alpha} \Delta\alpha. \quad (4)$$

При равенстве нулю одного из множителей в (4) получим $\Delta F = 0$. Это объясняет, почему точка пересечения с линией $\Delta F = 0$ на рис. 2, *b* смещается вместе с максимумами кривых на рис. 2, *a*, при которых $\partial F/\partial(h\nu) = 0$.

Уравнение (4) позволяет объяснить причину почти полного отсутствия различий между характеристиками фотоплеохроизма и производной фотопроводимости (рис. 4). Это становится понятным, если допустить, что произведение $[\partial(h\nu)/\partial\alpha]\Delta\alpha$ не зависит от энергии квантов, т.е. является постоянной величиной в данном спектральном диапазоне. В таком случае становится возможным определить функцию $\Delta\alpha(h\nu)$ из условия

$$[\partial(h\nu)/\partial\alpha]\Delta\alpha \approx 1,$$

т.е. величина анизотропии $\Delta\alpha$ пропорциональна производной коэффициента поглощения по энергии $\partial\alpha/\partial(h\nu)$. Для получения конкретной функции воспользуемся графиком зависимости коэффициента поглощения для гер-

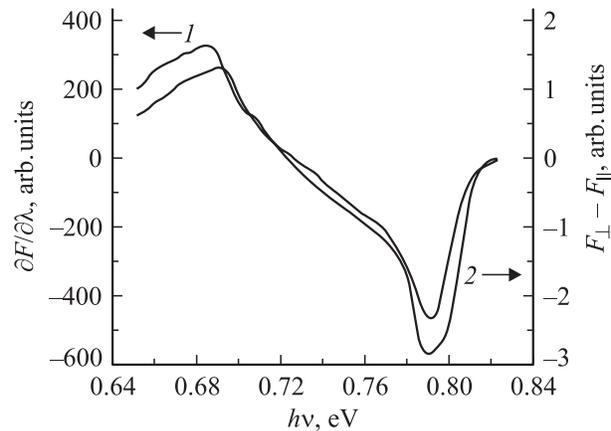


Рис. 4. Спектральные зависимости производной фотопроводимости, полученной дифференцированием кривой 3 на рис. 2, *a* (здесь — кривая 1), и фотоплеохроизма ΔF того же образца Ge при $s = 10^4$ см/с, кривая 2.

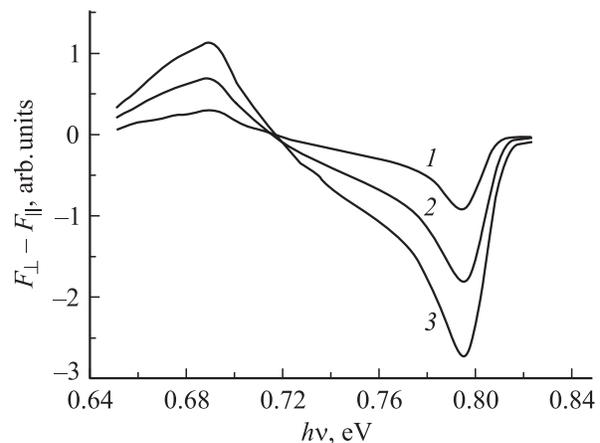


Рис. 5. Спектральные характеристики фотоплеохроизма ΔF образца Ge при $s = 10^4$ см/с, деформированного различными величинами механического напряжения, кбар: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3.

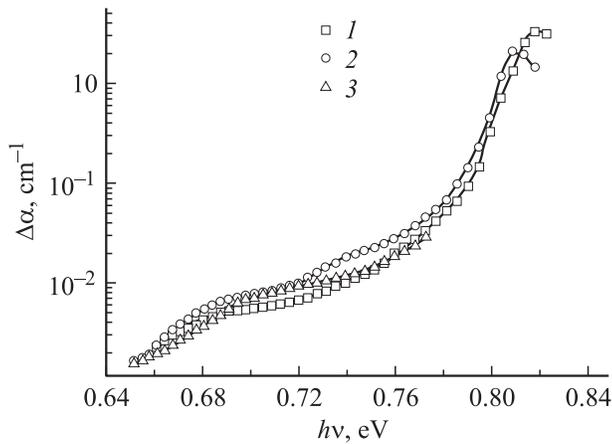


Рис. 6. Спектральные характеристики $\Delta\alpha$ — одного из сомножителей характеристики фотоплекроизма (4), полученные методами: 1 — дифференцирования типичной спектральной характеристики коэффициента поглощения $\Delta\alpha = \partial\alpha/\partial(h\nu)$, 2 — расчета по результатам измерения фотопроводимости и фотоплекроизма $\Delta\alpha = \Delta F/(\partial F/\partial\alpha)$, 3 — расчета по результатам измерения линейного дихроизма $\Delta\alpha = (1/d) \ln(1 + \Delta T/T)$.

мания, заимствованным из [12]. Результат графического дифференцирования этой зависимости изображен на рис. 6 кривой 1.

Уместно отметить, что именно такая модель, следующая из расчета в [13], использована для объяснения эксперимента в [6]. Ее суть состоит в смещении спектральной зависимости коэффициента поглощения для перпендикулярной (по отношению к направлению деформации) поляризации на величину расщепления зон в деформированном образце.

Правомочность выше приведенного допущения можно проверить двумя независимыми способами. В одном из них из соотношения (3) вычислим функцию $\Delta\alpha(h\nu)$, используя графическое дифференцирование спектра фотопроводимости $F(h\nu)$ по использованной выше функции $\alpha(h\nu)$: $\Delta\alpha = \Delta F/(\partial F/\partial\alpha)$. Результат этой процедуры приведен на рис. 6 кривой 2. Еще более независимый способ основан на использовании эффекта дихроизма, где из преобразования соотношения, связывающего величину пропускания T и коэффициент поглощения, получается выражение

$$\Delta\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right).$$

Для этого из дополнительно измеренных с применением используемой методики зависимостей $\Delta T(h\nu)$ и $T(h\nu)$ путем расчета по приведенному соотношению получаем еще одну функцию $\Delta\alpha$, изображенную на рис. 6 кривой 3. Ее спектральный диапазон ограничивается конечной толщиной образца, но совпадение всех трех характеристик более чем удовлетворительное. Имеющееся же расхождение вполне укладывается в погрешности графического дифференцирования и измерительной аппаратуры.

4. В заключение отметим прежде всего, что полученные значения фотоплекроизма, составляющие максимальную величину не более 10%, возможно было зарегистрировать только с помощью использованной дифференциальной методики. О достоверности кривых на рис. 2, *b* можно судить по тому факту, что максимальные их значения превышают уровень шума измерительной системы на 2 порядка.

Как и ожидалось, спектральные характеристики фотоплекроизма, полученные с помощью метода ПМ, отражают особенности энергетического спектра зон. Это видно по тому факту, что положение по шкале энергии отрицательных экстремумов кривых фотоплекроизма на рис. 2, *b* и 5 не связаны с величинами деформирующего усилия или скорости поверхностной рекомбинации. Действительно, в кристалле германия при энергии $h\nu = 0.798$ эВ имеет место сингулярность в виде точки M_0 зоны Бриллюэна [14], т.е. в месте происходящих в точке Γ прямых переходов между уровнями энергии Γ'_{25} и Γ'_2 .

Независимым подтверждением этого вывода могут служить результаты анализа спектральной характеристики фотоплекроизма в кристалле InSb, приведенной на рис. 3 в работе [6]. Поляризационная разница фотопроводимостей, вычисленная из этого рисунка, представляет собой аналогичную знакопеременную зависимость. Причем, как и в нашем случае, отрицательный экстремум расположен при том значении энергии, которое отлично согласуется с величиной запрещенной зоны при указанной температуре в этом материале, являющимся прямозонным полупроводником.

Подчеркнем, что отрицательная часть характеристик фотоплекроизма целиком определяется эффектом линейного дихроизма, продемонстрированного в работе [2] на примере деформированных образцов кремния. В самом деле, точка пересечения нуля α_0 зависимостью $\Delta F(h\nu)$, которая стабилизируется при стремлении величины скорости поверхностной рекомбинации к бесконечности, является характерной. Эта точка, выраженная значением коэффициента поглощения, коррелирует с величиной длины диффузионного смещения носителей заряда и удовлетворительно согласуется с условием $1/\alpha_0 \simeq L$. Что же касается равенства 0 амплитудных значений характеристик фотоплекроизма при энергии около 0.8 эВ, то, как и в случае линейного дихроизма, здесь коэффициенты поглощения обеих поляризаций принимают такие большие значения, что разница между ними не выходит за пределы величины L . Другими словами, можно говорить в данном случае, что плекроизм в фотопроводимости — это дихроизм на диффузионной длине. Однако, как установлено нами ранее, спектральная характеристика линейного дихроизма определяется исключительно особенностями энергетических зон кристалла. В то же время спектры плекроизма в фотопроводимости зависят, кроме того, от рекомбинационных параметров материала и свойств поверхности образца.

Можно было бы ожидать влияния состояния поляризации возбуждаемого света (эффект оптического выстраивания импульсов [15]) на кинетические параметры, например на подвижность, и, как следствие, на фототок. Однако, учитывая малые времена релаксации по импульсу при $T = 300$ К и неблагоприятную кристаллографическую ориентацию для проявления этого эффекта, его экспериментальное проявление представляется маловероятным.

Отметим возможность использования исследованного явления для диагностики внутренних механических напряжений в кристаллах. Как оказалось, минимальное значение механического напряжения величиной примерно 10 кг/см^2 является достоверно регистрируемым с применением стандартной измерительной аппаратуры. Следует иметь в виду, что это значение деформации относится к такому значению плеохроизма, которое наблюдается в образце с максимальной скоростью поверхностной рекомбинации.

Список литературы

- [1] I.I. Boiko, Ye.F. Venger, Ye.V. Nikitenko, B.K. Serdega. *Semicond. Ph., Quant. Electron. Opt.*, **2**, 352 (1999).
- [2] Е.Ф. Венгер, И.Е. Матяш, Б.К. Сердега. *Опт. и спектр.*, **94** (1), 38 (2003).
- [3] А.А. Лебедев, К. Овезов и др. *Письма ЖТФ*, **2**, 385 (1976).
- [4] Г.А. Медведкин. *ФТП*, **34**, 533 (2000).
- [5] Г.К. Аверкиева, А. Мамедов и др. *ФТП*, **12**, 1732 (1978).
- [6] Ф.Т. Васько, С.Г. Гасан-заде, М.В. Стриха, Г.А. Шепельский. *ФТП*, **29** (4), 708 (1995).
- [7] Б.Б. Кричевцов. *Письма ЖЭТФ*, **74** (3), 177 (2001).
- [8] S.N. Jaspersen, S.E. Sahnatterly. *Rev. Sci. Instrum.*, **40** (6), 761 (1969).
- [9] T.S. Moss. *Rep. Progr. Phys.*, **28**, 15 (1985).
- [10] М. Кардона. *Модуляционная спектроскопия* (М., Мир, 1972).
- [11] Е.Ф. Венгер, И.Е. Матяш, Б.К. Сердега. *ФТП*, **37** (10), 1188 (2003).
- [12] W.C. Dash, F. Newman. *Phys. Rev.*, **99**, 1151 (1955).
- [13] Ф.Т. Васько, М.В. Стриха. *ФТП*, **24** (17), 1227 (1990).
- [14] V.O. Serafin, R.V. Hess. *Phys. Rev. Lett.*, **14**, 138 (1965).
- [15] М.И. Карамаш, В.П. Мушинский, Г.М. Шмелев. *ЖТФ*, **53**, 1198 (1983).

Редактор Т.А. Полянская

An analysis of polarization modulation spectra of photopleochroism induced by a uniaxial stress in crystal of Ge

I.E. Matyash, B.K. Serdega

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine