

ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ МАЛОИНТЕНСИВНОМ ОБЛУЧЕНИИ КРЕМНИЯ СВЕТОМ

Д.И.Тетельбаум¹⁾, В.А.Пантелеев, М.В.Гуткин

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского
603600 г. Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 16 июля 1999 г.

Сообщается о новом эффекте, экспериментально обнаруженном в кремнии при облучении светом видимого диапазона с плотностью мощности $0.2-1.5 \text{ Вт/см}^2$ в течении 8 с. Эффект заключается в повышении микротвердости на стороне, противоположной облучаемой, и не носит чисто термического характера. С течением времени после облучения изменения спадают по экспоненциальному закону, с энергией активации $0.75 \pm 0.05 \text{ эВ}$, характерной для миграции и переориентации одного из видов собственных междоузельных атомов. Дано качественное объяснение эффекта на основе модели, ранее предложенной для случая эффекта дальнего действия при ионном облучении.

PACS: 61.80.Ba, 68.35.Gy

В данной работе обнаружен новый эффект, находящийся на стыке двух групп ранее изучавшихся явлений: эффекта дальнего действия (ЭД) при облучении твердых тел заряженными частицами [1-3] и дефектообразования в полупроводниках при фотонном облучении [4, 5]. ЭД первоначально был обнаружен при ионном облучении полупроводников и металлов. Суть его заключается в изменении структуры и свойств на аномально больших глубинах, превосходящих пробеги ионов в сотни и тысячи раз. Позднее выяснилось, что аналогичный эффект имеет место и при других видах воздействий на поверхностные слои твердых тел – таких, как электронное облучение, полировка, плазменное и химическое травление, трение и т. д. При этом в одних случаях эффект удается объяснить в рамках традиционных представлений, опираясь на существование сильного нестационарного нагрева приповерхностного слоя и сопутствующие явления, например, неоднородную деформацию и возбуждение ударных волн. В других же случаях нагрев явно недостаточен для возникновения этих явлений. Сюда относятся, например, изучавшиеся в наших работах малодозный эффект дальнего действия (МЭД) в металлах [3] и ЭД в кремнии [6-9]. Нами [1-3, 6-8] предлагалась модель ЭД, основанная на представлении о генерации упругих волн в зоне выделения энергии и их взаимодействии с протяженными дефектами. Роль последних вытекает из того, что и МЭД и ЭД в кремнии наблюдались лишь в материалах, содержащих высокую концентрацию протяженных дефектов – границы зерен, субзерен, дислокационных петель, дефектов упаковки и т. д.

Важной характерной чертой МЭД являлось отсутствие корреляции с механизмом непосредственной передачи энергии пучков частиц твердому телу – он проявлялся практически одинаково при облучении тяжелыми и легкими ионами, а также электронами, тогда как в первом случае доминирует ядерное (упругое) торможение, во

¹⁾ e-mail: ett@phys.unn.runnet.ru

втором случае – электронное, а в третьем случае вся энергия падающих частиц первоначально передается электронной подсистеме. Исходя из этого факта, естественно было обратиться к другой группе явлений – подпороговому дефектообразованию в полупроводниках. Этому вопросу посвящена обширная литература (см. [4, 5]), касающаяся облучения электронами, жестким (вакуумным) ультрафиолетом, рентгеновскими лучами, а также светом (фотохимические реакции [10]). Обсуждаются многочисленные экспериментальные данные по стимулированной диффузии примесей, изменению электрических и оптических свойств; представлен ряд моделей подпороговых эффектов. К этим работам примыкают исследования так называемого фотомеханического эффекта – изменения микротвердости полупроводников и диэлектриков при освещении непосредственно в процессе вдавливания индентора [11]. Имеется сообщение о том, что при засветке металлических пленок и фольг вакуумным ультрафиолетом наблюдаются изменения механических свойств [12]. Так как в металлах глубина проникновения вакуумного ультрафиолета весьма мала, такие изменения можно объяснить лишь ЭД.

В [13] нами сообщалось об эффекте фотомеханической памяти металлов, где на примере фольг пермаллоя установлено изменение микротвердости на стороне, противоположной облучаемой при облучении лазером с длиной волны 0.95 мкм. Эффект не был связан с нагревом и объяснялся на основе модели, ранее применявшейся нами для случая МЭД при ионном облучении.

Все сказанное выше позволило предположить, что дальнедействующее влияние относительно слабых потоков света на свойства полупроводников в принципе возможно и не ограничивается чисто электронными процессами, а может вызывать структурные изменения. Однако в литературе не удалось найти каких-либо указаний на это для элементарных ковалентных полупроводников (типа кремния или A_3B_5), за исключением данных о стимулированной светом диффузии некоторых примесей (Au и др.) [4, 5].

В данной работе использовались пластины кремния толщиной 0.5 мм, подвергнутые термическому окислению в цикле "сухой – влажный – сухой". (Ранее [7] было установлено, что в окисленном кремнии, где поверхностные слои обогащены окислительными дефектами упаковки, наиболее ярко проявляется ЭД при ионном облучении.) Пластины перед окислением были с одной стороны полированы механически, с другой – химико-механически с последующим динамическим травлением. Окисные слои перед облучением были удалены. Облучение светом галогенной лампы (300 Вт) с интенсивностью светового потока $I = 0.2 - 1.5 \text{ Вт/см}^2$ осуществлялось в течение $\tau = 8 \text{ с}$ со стороны, подвергнутой механической полировке. После облучения с противоположной стороны проводились измерения микротвердости H при нагрузке 200 г. Метод микротвердости был выбран нами потому, что он являлся тестовым при исследовании ЭД в твердых телах. Изменения H сигнализируют о наличии не просто электронных, а структурных изменений, которые в дальнейшем следует исследовать более тонкими методами. Предварительно было найдено, что изменения H практически не возрастают при $\tau > 8 \text{ с}$. Нагрузка 20 г была близка к оптимальной с точки зрения компромисса между чувствительностью H к облучению и минимизацией ошибки эксперимента. Погрешность измерений H с учетом статистики не превышала 3% на уровне вероятности 0.95. Время между засветкой и измерениями H составляло (кроме опытов по релаксации) порядка 10–100 мин.

Основная часть опытов была проведена с использованием светофильтра ЖС-16, поглощающего излучение с $\lambda \leq 0.5$ мкм. Это было сделано для того, чтобы отсеять возможные эффекты, характерные для больших энергий квантов и описанные в [4,5]. Для уменьшения нагрева образцов световым пучком они крепились на массивном металлическом фланце, при этом температура не превышала 50 °С. Часть образцов для улучшения теплоотвода крепилась к фланцу через вакуумную смазку, тогда нагрев практически отсутствовал.

Эксперименты показали, что облучение вызывает повышение H , достигающее 20%. Прежде чем обсуждать это явление с точки зрения механизмов, ранее предложенных нами для случая ионного облучения, необходимо рассмотреть возможность альтернативных объяснений.

1. *Влияние чисто термического действия светового пучка.* Для проверки нами проводился отжиг в печи при 130 °С, то есть при температуре, заведомо более высокой, чем достигается под пучком. В пределах погрешности величина H не менялась. Нетермический характер эффекта подтверждался тем, что он отсутствовал для образцов, у которых с облучаемой стороны предварительно был удален слой ~ 20 мкм, обогащенный дефектами упаковки. Влияние этого слоя обсуждается ниже. Кроме того, эффект не исчезал при креплении образцов через вакуумную смазку.

2. *Влияние проникновения света на тыльную сторону.* Этот фактор в нашем случае также можно исключить. Через толщу образца проникали лишь кванты с энергией $E_{ph} \leq E_g$, где E_g – ширина запрещенной зоны. Однако при использовании кремниевого фильтра не наблюдалось изменений H на стороне образца, обращенной к фильтру (а также и на противоположной). В то же время, эффект не исчезал при использовании фильтров, пропускающих свет с энергией фотонов $E_{ph} \geq 2$ эВ, для которых $k^{-1} < 3$ мкм, где k – коэффициент поглощения.

3. *Влияние на тыльную сторону избыточных неосновных носителей.* И этот фактор несущественен, так как диффузионная длина неосновных носителей составляла ~ 20 мкм, то есть была более чем на порядок меньше толщины образцов. Кроме того, уточнение образцов в 2 раза не усилило, а наоборот, ослабило эффект (из-за травливания обогащенных дефектами упаковки слоев).

Итак, эффект явно обусловлен поглощением в образце квантов, возбуждающих электронно-дырочные пары. Кроме того, важную роль играют протяженные дефекты – окислительные дефекты упаковки. Сопоставляя эти факты с ранее полученными результатами по ЭД при ионном облучении [1–3, 6–8], можно с большой степенью вероятности предположить, что в основе данного эффекта лежит тот же механизм, а именно генерация упругих волн и их взаимодействие с системой дефектов при наличии положительной обратной связи между упругими волнами и системой дефектов. В случае ионного облучения источником упругих волн являются реакции между радиационными дефектами и (или) тепловые пики [1]. В случае же светового облучения упругие волны возникают при рекомбинации возбужденных носителей через центры рекомбинации (точечные дефекты). Освободившаяся при этом энергия, в соответствии с моделью Ланга [4, 5], передается дефекту, увеличивая амплитуду его колебаний. Далее вступают в "игру" цепные процессы с участием протяженных дефектов, приводящие, в конце концов, к передаче энергии дефектам вблизи тыльной стороны пластины и связанному с этим изменению H . Более детально этот механизм применительно к случаю ионного облучения описан нами в [1,8], а детали

механизма для случая фотонного облучения будут изложены отдельно (см. также [13]).

На рис.1 показана зависимость величины эффекта (относительного возрастания H) от плотности мощности, регулируемой расстоянием между источником и образцом. Характерная нелинейность зависимости и наличие пороговой мощности ранее нами наблюдались для ионного облучения кремния [6], причем количественно эти зависимости оказываются весьма близки, что еще раз подчеркивает единство природы обоих эффектов.

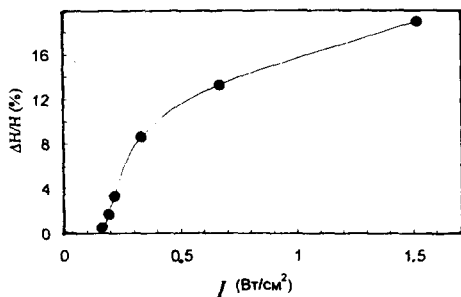


Рис.1. Зависимость относительного изменения микротвердости от плотности мощности при облучении светом через светофильтр ЖС-16

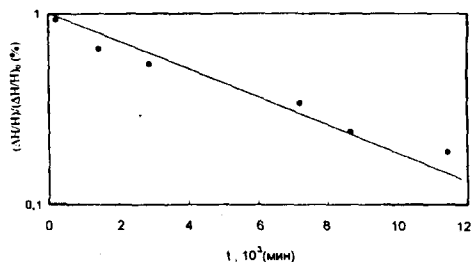


Рис.2. Изменение микротвердости при комнатной температуре после облучения светом с плотностью мощности 1.5 Вт/см²

В отличие от случая ионного облучения изменение H не стабильно во времени и релаксирует в течение нескольких суток по экспоненциальному закону, то есть релаксация происходит в результате мономолекулярной реакции (рис.2). Путем ускоренной релаксации при температуре 60–100 °С найдена энергия активации процесса, которая оказалась равной 0.75 ± 0.05 эВ. Это близко к энергии миграции и переориентации одного из видов собственных междоузельных атомов кремния [14]. Можно полагать, что именно реакции с участием собственных междоузельных атомов лимитируют процесс структурной релаксации после облучения вблизи поверхности – у границы с естественным окислом.

Обсудим обнаруженный здесь эффект с точки зрения сопоставления с данными других авторов. Подпороговые эффекты в полупроводниках исследовались преимущественно для электронного и рентгеновского излучений. При этом для $IbSb$ и Ge эти эффекты объяснялись в рамках примесного – ионизационного механизма, который, однако, не эффективен для Si [5]. Для последнего подпороговый механизм дефектообразования связывают с ионизацией K -оболочки, что исключено при световом облучении. Неприменимы к Si и диссоциативные (фотохимические) механизмы, обсуждавшиеся для сложных полупроводников [5]. Механизм дефектообразования, предложенный Шейнкманом [10], в общей форме применим и для элементарных полупроводников, однако, он не объясняет дальнего действия. Ситуации, рассматриваемые в работах по влиянию света на диффузию примесей в кремнии, существенно отличаются от нашего случая. Таким образом, мы имеем дело действительно с новым эффектом.

Если дальнедействующие изменения структуры и свойств существуют в полупроводниках при воздействии относительно слабых световых потоков, это важно при изучении целого ряда электрических и фотоэлектрических явлений в полупроводни-

ковых материалах и приборах. Подобные явления могут служить одной из причин взаимного влияния функционирующих структур в матрицах транзисторов, ЛПД и т. д. Они могут влиять на деградацию и шумовые свойства приборов (инжекция носителей заряда может осуществляться не только светом, но и электрическим полем), а также на свойства низкоразмерных структур. Критерий высокой концентрации протяженных дефектов не служит слишком сильным ограничителем – он выполняется в широком классе полупроводниковых приборов, в том числе многих структур с пониженной размерностью (квантовые ямы и квантовые точки).

В заключение отметим некоторые соображения о причинах, по которым эффект не был обнаружен раньше.

1. Он может наблюдаться лишь при одновременном сочетании следующих условий: достаточная плотность мощности; наличие специфических протяженных дефектов, например, дефектов упаковки; ограниченный промежуток времени между воздействием и измерением (с учетом релаксации); определенная длительность воздействия.

2. Обычно явлениями на нерабочей стороне пластины интересовались с точки зрения геттерирования примесей, а возможность взаимного влияния элементов структуры на рабочей стороне рассматривалась лишь в чисто электронном или фотоэлектронном аспекте либо с точки зрения статических полей упругих напряжений. Установление эффекта было стимулировано изучением ЭД при ионном облучении.

-
1. П.В.Павлов, Ю.А.Семина, В.Д.Скупов и др., ФТП **20**, 503 (1986).
 2. P.V.Pavlov, D.I.Tetelbaum, V.D.Skupov et al., Phys. Stat. Sol. (a) **94**, 395 (1986).
 3. D.I.Tetelbaum, E.V.Kurilchik, and N.D.Latisheva, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **B127/128**, 153 (1997).
 4. М.И.Клингер, Ч.Б.Лушник, Т.В.Машовец и др., УФН **147**, 523 (1985).
 5. В.С.Вавилов, А.Е.Кив, О.Р.Ниязова, *Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках*, М.: Наука, 1981.
 6. П.В.Павлов, Д.И.Тетельбаум, Е.В.Курильчик и др., Высокочистые вещества **4**, 26 (1993).
 7. В.Д.Скупов, Д.И.Тетельбаум, В.Г.Шенгуров, Письма в ЖТФ **15**, 44 (1989).
 8. Ю.А.Семина, В.Д.Скупов, Д.И.Тетельбаум, Письма в ЖТФ **14**, 273 (1988).
 9. Yu.A.Aleshenko, E.A.Bobrova, V.S.Vavilov et al., Rad. Eff. and Defects in Solids **25**, 323 (1993).
 10. М.К.Шейнкман, Письма в ЖЭТФ **38**, 278 (1983).
 11. Н.Н.Новиков, Украинский физ. журнал **17**, 724 (1972).
 12. А.А.Козьма, С.В.Малыхин, О.В.Соболь и др., Физика металлов и металловедение **7**, 168 (1991).
 13. Д.И.Тетельбаум, А.Ю.Азов, А.А.Трофимов и др., Письма в ЖТФ **24**, 9 (1998).
 14. А.Зеегер, Х.Фель, В.Франк, в кн.: *Точечные дефекты в твердых телах*, М.: Мир, 1979 [A.Zeeger, H.Foll, and W.Frank, in: *Radiation Effects in Semiconductors*, 1976].