

PACS: 61.46.Df, 64.70. Nd, 78.67.Bf., 82.50.Np.

О РАЗРУШЕНИИ КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.Г.КЯЗЫМ-ЗАДЕ*, В.М.САЛМАНОВ*,
А.А.САЛМАНОВА**, А.М.АЛИЕВА***

*Бакинский Государственный Университет

**Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия

***Институт Физики НАН Азербайджана
vagif_salmanov@yahoo.com

Исследованы механизмы поглощения и разрушения кремния при воздействии коротких импульсов YAG: Nd³⁺ лазера. Показано, что разрушения в Si обусловлены локальным нагревом, вызванным безизлучательной рекомбинацией электронно-дырочных пар, генерированных лазерным светом, а также поглощением на неравновесных свободных носителях.

Ключевые слова: лазер, кремний, разрушение.

Появление мощных источников когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне позволяет исследовать особенности взаимодействия такого излучения с веществом в весьма широком интервале интенсивностей. При высоких интенсивностях заметную роль начинают играть различного рода нелинейные эффекты взаимодействия излучения с веществом, а обычные механизмы поглощения и рассеяния света приобретают специфическую окраску из-за большого удельного энерговыделения. В связи с этим неизбежно встает вопрос о поведении твердой среды, испытывающей влияние мощного лазерного пучка. При этом особый интерес вызывает механизм их разрушения, связанный, в свою очередь, с процессом поглощения и рассеяния электромагнитной энергии в веществе. В зависимости от природы исследуемого материала механизм поглощения лазерного излучения и, соответственно, механизм разрушения могут существенно меняться.

В данной работе рассматривается вопрос о поглощении лазерного излучения и связанные с этим поглощением процессы разрушения в кремнии. Интерес к воздействию на кремний лазерного излучения непрерывно растет. В частности, активно изучается возможность использования текстур, получаемых на поверхности кремния под действием ла-

зерного излучения для создания перспективных конструкций солнечных элементов [1-7].

В качестве источника излучения использовался YAG: Nd³⁺ лазер ($\lambda=1,06$ мкм), генерирующий световые импульсы длительностью $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ сек. Максимальный поток световой энергии $\sim 10^5$ Дж/см². Лазерное излучение фокусировалось на поверхности образца в пятно размером 0,3-1,0 мм.

Объектами исследования являлись четыре группы образцов монокристаллического кремния р-типа, соответственно, с концентрацией дырок $5 \cdot 10^{12}$ см⁻³, $3 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $4 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и $9 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Эти образцы представляли собой пластинки толщиной от 0,03 до 0,17 см с тщательно отполированной поверхностью.

Экспериментально исследовались кривые пропускания указанных образцов кремния при температурах 300 и 77 К. При измерении кривых пропускания и исследовании процесса разрушения проводилось последовательное снятие прямого и обратного хода, так что после фиксации каждой изучаемой точки (прямой ход) заново измерялось пропускание в предшествующей точке (обратный ход). Критерием наличия разрушения помимо визуального наблюдения, служило несовпадение прямого и обратного хода. Кроме того, для контроля разрушения проводилось также зондирование облучаемого участка лучом пробного He-Ne лазера. Рассеянное излучение пробного лазера регистрировалось под углом 45° к поверхности с начала облучения поверхности.

На рис.1 приведены зависимость интенсивности прошедшего света I от интенсивности падающего света I_0 для образца с равновесной концентрацией дырок $5 \cdot 10^{12}$ см⁻³ и находящегося соответственно, при температурах 300 и 77 К. Из рисунка видно, что при комнатной температуре зависимость $I=f(I_0)$ в широком интервале интенсивностей I_0 сохраняет линейный характер. При интенсивностях выше порога разрушения $I_{кр.}$ на кривой, естественно, появляется заметный излом, связанный с увеличением рассеяния падающего света на возникшей структурной неоднородности (лунка на поверхности). В случае того же образца, находящегося при азотной температуре, линейная зависимость с ростом интенсивности переходит в сублинейную еще до порога разрушения. При этом порог разрушения при азотной температуре увеличивается более чем в три раза по сравнению с соответствующей величиной при комнатной температуре. Аналогичные зависимости наблюдались и для образцов второй группы с $p_0 = 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Отметим, что соответствующие значения порога разрушения при 300 и 77 К в этих образцах практически те же, что и в случае очень чистых кристаллов.

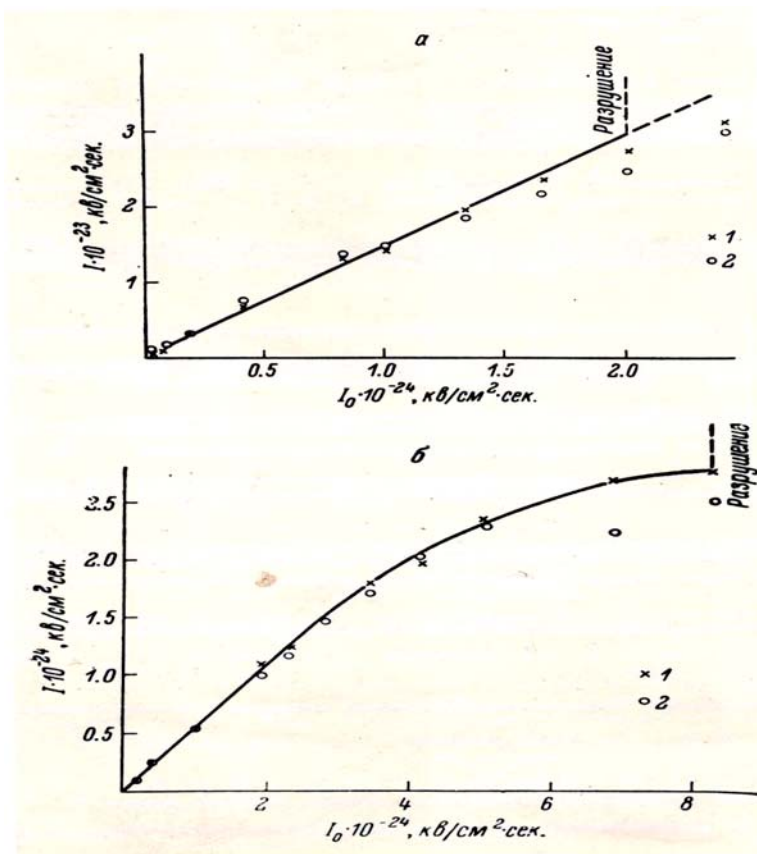


Рис. 1. Кривые пропускания для слабо легированного образца. Т, К: а- 300, б – 77.

На рис.2 представлены зависимости $I=f(I_0)$ для сильно легированных образцов, соответственно, при температурах 300 и 77 К. Как видно из приведенных кривых, во всей области интенсивностей I_0 , вплоть до порога разрушения как при комнатной, так и при азотной температурах не наблюдается никакого отклонения от линейности. При этом, однако, оказывается, что порог разрушения $I_{кр.}$ при комнатной температуре заметно ниже, чем соответствующая величина в чистых образцах, разница же в $I_{кр.}$ для сильно легированных образцов при комнатной и азотной температурах сравнительно невелика при сопоставлении с аналогичной зависимостью в чистых образцах.

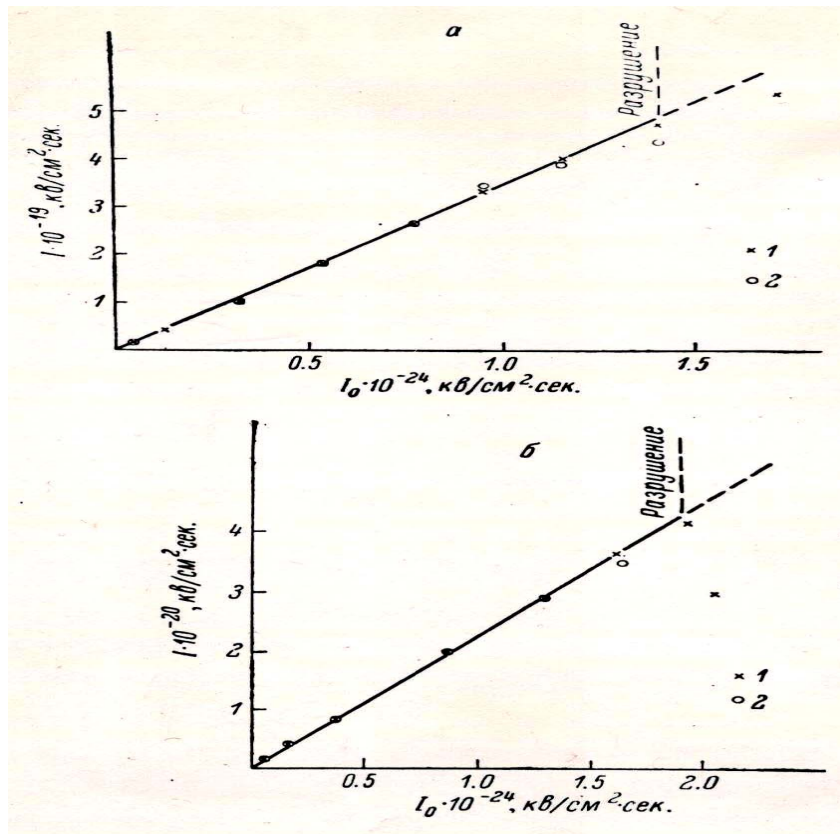


Рис. 2. Кривые пропускания для сильно легированного образца.
Т, К: а- 300, б – 77.

Известно, что в полупроводниках в зависимости от соотношения между шириной запрещенной зоны (E_g) и величиной энергии кванта лазерного света ($h\nu$), а также от концентрации свободных носителей тока и времени безызлучательных переходов может осуществляться следующие четыре типа механизмов разрушения:

1. «Диэлектрический» ($h\nu \ll E_g$) – поглощение на примесных атомах несущественно, свободные носители в зоне проводимости и валентной зоне отсутствуют. В этом случае возможен один из следующих механизмов поглощения света: взаимодействие с решеткой, непосредственное поглощение света на неоднородностях, многофотонные процессы и т.п.
2. «Металлический» ($h\nu \gg E_g$) – многофотонные процессы и поглощение на примесях и неоднородностях несущественны, имеются сво-

бодные носители в разрешенной зоне. Поглощение определяется взаимодействием свободными носителями тока.

3. «Индукцированный металлический» ($h\nu > E_g$) – время безызлучательных переходов велико. Поглощение на неравновесных свободных носителей тока, превышает собственное поглощение.
4. «Полупроводниковый» ($h\nu > E_g$) – время безызлучательных переходов мало. Низкая равновесная концентрация носителей тока.

Наблюдаемые нами закономерности, в частности, наличие нелинейного поглощения в чистых образцах при азотной температуре, свидетельствуют о том, что наряду с междузонным поглощением и поглощением на равновесных носителях в нашем случае оказывается существенным и поглощение на неравновесных свободных носителях, генерируемых этим же светом («индуцированное металлическое» поглощение).

Для расчета величины прошедшего света при этих предположениях, запишем уравнение для интенсивности света dI , поглощаемой в слое dx , в форме

$$dI = -(\kappa_z + \kappa_{p.n.})I dx - \kappa_{n.n.} I dx, \quad (1)$$

где I – интенсивность падающего света; $k_{p.n.}$ - коэффициент поглощения света равновесными свободными носителями; k_z - коэффициент поглощения света за счет переходов между валентной зоной и зоной проводимости; $k_{n.n.} = \kappa_z \beta \sigma \tau I$ - коэффициент поглощения света неравновесными свободными носителями; β - квантовый выход; τ - время жизни неравновесных носителей; σ - сечение захвата фотона свободным носителем тока.

С учетом зависимости $k_{n.n.}$ от интенсивности света выражение (1) можно записать следующим образом

$$dI = -\alpha I dx - k_z \beta \tau \sigma I^2 dx, \quad (2)$$

где $\alpha = k_z + \kappa_{p.n.}$

Решение уравнение (2) имеет следующий вид

$$I = \frac{I_0}{(1 + k_z \frac{\beta \tau \sigma I_0}{\alpha}) \exp(\alpha x) - k_z \frac{\beta \tau \sigma I_0}{\alpha}} \quad (3)$$

В случае малых интенсивностей падающего света I_0 , когда $k_z \frac{\beta \tau \sigma I_0}{\alpha} \ll 1$, выражение (3) имеет обычный вид $I = I_0 \exp(-\alpha x)$, что соответствует линейной зависимости $I = f(I_0)$.

В случае же больших I_0 , когда поглощения света на неравновесных носителях $k_{н.н.}$ становится соизмеримым с величиной α , как видно из выражения (3) зависимость $I = f(I_0)$ приобретает сублинейный характер, что фактически обусловлено вступлением в игру дополнительного механизма поглощения, зависящего, в свою очередь, от интенсивности падающего света. С этой точки зрения становится понятным наличие заметной сублинейной зависимости на кривых пропускания для слабо легированных образцов при азотной температуре. Действительно в этом случае за счет падения коэффициент межзонного поглощения k_3 из-за увеличения ширины запрещенной зоны при понижении температуры удается еще до разрушения реализовать случай, когда $k_{н.н.}$ становится порядка α , что позволяет наблюдать сублинейность в кривых пропускания. В соответствии с введенной классификацией, рассматриваемый случай близок к «индуцированному металлическому» механизму разрушения. Для этих же образцов при комнатной температуре из-за значительной величины k_3 область сублинейности должна либо сильно уменьшиться, либо совсем исчезнуть. Однако ввиду ступенчатого изменения интенсивности падающего света сделать определенные выводы о наличии или отсутствии сублинейности из приведенных кривых не представляется возможным. Тем не менее, общий характер кривой поглощения, по-видимому, свидетельствует о «полупроводниковом» характере разрушения в этом случае.

Пользуясь приведенным выше выражением (3), можно из сублинейного участка кривых пропускания при азотной температуре оценить максимальную концентрацию генерируемых неравновесных носителей Δn , величину времени жизни τ при этом уровне возбуждения и, соответственно, величину коэффициента поглощения $k_{н.н.}$, обусловленного неравновесными носителями. Приняв в качестве величины σ значение $5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ (приведенное значение σ определялось, исходя из величин коэффициента поглощения в сильно легированных образцах), для чистого образца получаем, соответственно, $\Delta n \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\tau \sim 10^{-7} \text{ сек}$, $k_{н.н.} \sim 25 \text{ см}^{-1}$. В случае сильно легированных образцов наличие сравнительно больших величин коэффициентов поглощения (например, для образца с концентрацией носителей $9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $k=350 \text{ см}^{-1}$ при 300 К) свидетельствует, что в этом случае поглощение лазерного света при всех интенсивностях вплоть до разрушения обусловлено поглощением свободными равновесными носителями тока («металлический» механизм разрушения). На это же указывает приведенная выше оценка величины $k_{н.н.}$. Естественно, в таком случае кривые пропускания должны быть линейными при всех интенсивностях как при комнатной, так и при азотной темпера-

туре, что действительно и наблюдается на опыте. Механизм разрушения в данном случае чисто «металлический».

Наряду с изучением характера поглощения лазерного излучения и разрушения, как уже отмечалось выше, представляет интерес и вопрос о пороговой энергии лазерного пучка $E_{кр}$, вызывающей появление необратимых структурных изменений в исследуемых образцах. Соответствующие данные приведены в таблице.

Концентрация легирующей примеси(см ⁻³)	$E_{кр}$. (дж) T=300 К	Классификация механизма разрушения	$E_{кр}$. (дж) T=77 К	Классификация механизма разрушения
$5 \cdot 10^{12}$	0,37	полупроводниковый	1,55	Индукцированный металлический
$3 \cdot 10^{17}$	0,38	то же	1,50	то же
$4 \cdot 10^{19}$	0,28	металлический	0,38	металлический
$9 \cdot 10^{19}$	0,26	то же	0,35	то же

ЛИТЕРАТУРА

1. Блумс Ю., Гацкевич Е.И., Ивлев Г.В. Образование донорных центров в кремнии под действием импульсного лазерного излучения / 4-я Межд. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, 2001, с.108-110.
2. Makin V.S., Pestov Y.I. Laser-induced tip-shaped pump formation on silicon and germanium surfaces. / X International Conference “Nonresonant Laser-Matter Interaction”, St. Petersburg, 2000, p. 37-40.
3. Панченко В.Я., Новодворский О.А., Голубев В.С. Технология лазерно-плазменного напыления пленок нанометровых толщин // Наука и технологии в промышленности, 2006, №4, с. 39-51.
4. Володин В.А., Гацкевич У.И., Двуреченский А.В. и др. Модифицирование нанокластеров германия в кремнии под действием импульсного лазерного излучения // ФТП, 2003, т.37, в. 11, с.1352-1357.
5. Заботков С.В., Ежов А.А., Головань Л.А. и др. Формирование наночастиц на поверхности кремния под действием фемтосекундных лазерных импульсов //ФТП, 2007, т.41, в. 8, с.1018-1020.
6. Качурин Г.А., Черкова С.Г., Володин В.А., Марин Д.В., Deutschmann M. Действие мощных нано-и фемтосекундных лазерных импульсов на кремниевые наноструктуры // ФТП, 2008, т.42, в. 2, с.181-185.
7. Банишев А.Ф., Голубев В.С., Кремнев А.Ю. Разрушение поверхности кремния при импульсном воздействии лазерных импульсов // Сборник трудов ИПЛИТ РАН, М., 2011, с. 78-90.

LAZER ŞÜALARININ TƏSİRİ İLƏ SİLİSİUM KRİSTALLARININ DAĞILMASI

A.H.KAZIMZADƏ, V.M.SALMANOV, A.A.SALMANOVA, A.M.ƏLİYEVƏ

XÜLASƏ

YAG:Nd³⁺ lazer impulslarının təsiri ilə Si kristallarında optik udulma mexanizmləri və dağılma prosesi tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, Si kristallarında dağılma prosesi lazer

şüalarının təsiri ilə yaranan elektron-deşik cütünün şüalanmasız rekombinasiya və həmçinin tarazlıqda olmayan yükdaşıyıcılarda işığın udulması prosesləri nəticəsində qəfəsin lokal qızması hesabına baş verir.

Açar sözlər: lazer, silisium, dağılma.

ABOUT DESTRUCTION OF SILICON UNDER THE ACTION OF LASER RADIATION

A.H.KAZIMZADE, V.M.SALMANOV, A.A.SALMANOVA, A.M.ALIYEVA

SUMMARY

The mechanisms of absorption of laser radiation and destruction of silicon under the influence of YAG: Nd³⁺ short pulses of laser are investigated. It is shown, that destructions in Si are caused by the local heating induced by non – radiation recombination of electron-hole pairs generated by laser light, and by absorption on nonequilibrium free carriers.

Key words: laser, silicon, destruction.

Поступила в редакцию: 11.04.2011 г.

Принято к печати: 17.06.2011 г.