

УДК 621.315.592

Пороговое влияние локального импульсного лазерного облучения на поверхностные состояния окисного слоя на реальной поверхности германия

© С.В. Винценц, С.Г. Дмитриев, Р.А. Захаров[†], Г.С. Плотников[†]

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
141120 Фрязино, Московская область, Россия

[†] Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 10 июня 1996 г. Принята к печати 1 июля 1996 г.)

Представлены результаты изучения изменений спектров поверхностных состояний на реальной (с тонкой пленкой окисла) поверхности германия при действии локального (10–100 мкм) импульсного (0.1–1 мкс) лазерного облучения с расчетным уровнем нагрева поверхности $\sim (20-40)$ К. Показано, что порогам пластических деформаций в приповерхностной области полупроводника (связанным с возникающими локальными термонапряжениями) соответствуют пороговые же изменения спектров оптического заряжения медленных поверхностных состояний диэлектрика, а пороговые изменения быстрых состояний при этом не наблюдаются. Обсуждается природа эффекта.

При многократном ($N \geq 10^3-10^5$) импульсном ($\tau \approx 0.1-1$ мкс или меньше) лазерном воздействии на поверхностях полупроводников (и металлов) наблюдаются разрушения при весьма низких пороговых плотностях поглощенной энергии $W_a < 0.1$ Дж/см² [1–3], которые при радиусах луча $a \approx 10-100$ мкм характеризуются так называемым размерным эффектом: $W_a \sim a$ [1,4]. Для объяснения этого явления предлагались модели деформационного разрушения поверхности (на основе теоретического одномерного анализа) [5,6]. В работе [4] было показано, что связанные с размерным эффектом разрушения должны происходить под поверхностью образца на ранних (при малом числе импульсов) этапах облучения.

Для анализа этого положения были предприняты исследования мгновенных профилей термодформаций и смещений поверхностей полупроводников (и металлов) вблизи (в том числе ниже) порогов разрушения [7,8]. Было показано, что такие разрушения связаны с достижением порога пластичности (из-за возникающих при локальном разогреве сдвиговых напряжений), а разогрев поверхности весьма мал: $\Delta T \approx (20-40)$ К [7].

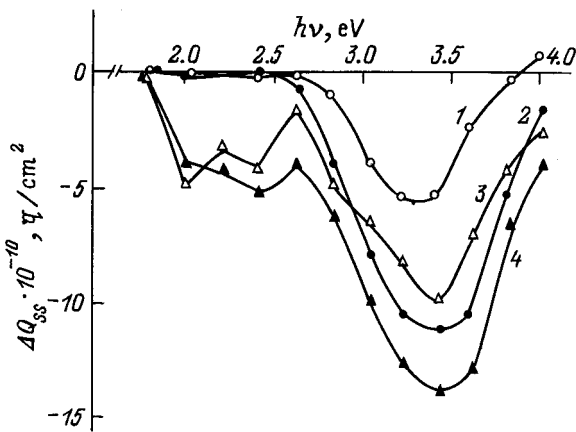
В настоящей работе проводились исследования изменений спектров оптического заряжения (ОЗ) медленных состояний диэлектрика (МСД), а также спектров быстрых состояний (БС) в структурах Ge–GeO₂ при переходе через указанный порог W_a при достаточно малом ($N \leq 10^3$) числе импульсов, когда видимые (в оптический микроскоп) разрушения поверхности образцов еще отсутствуют. Дело в том, что достаточно тонкие ($d \sim 30$ Å [9]) пленки диэлектрика на реальных поверхностях полупроводников, слабо влияя на деформации и напряжения в полупроводнике [10], могут быть чувствительны к пластическим (и упругим) фотодформациям в нем и служить тем самым эффективным датчиком малых пластических деформаций.

Изучались поверхности (111) высокоомных монокристаллов германия *n*-типа ($\rho = 25-30$ Ом · см), травленные в H₂O₂ [9,11]. Поверхностный потенциал, Y , скорость поверхностной рекомбинации, S , и плотность БС, N_{FS} , определялись методом квазиравновесного эффекта поля в комбинации со стационарной фотопроводимостью при температуре ~ 300 К [11]. Изменения поверхностного заряда на медленных состояниях ΔQ_{SS} при засветках полупроводника квантами света 1.8 эВ $\leq h\nu \leq 4.0$ эВ регистрировались эффектом поля (метод исследования спектров ОЗ МСД [12]).

Облучение поверхности германия (15×5 мм²) осуществлялось сфокусированным ($2a \approx 70$ мкм) лучом второй гармоники ($\lambda = 0.53$ мкм) импульсного (с передним фронтом $\tau_c \sim 350$ нс и полной длительностью ~ 1 мкс [4]) лазера на алюмоиттриевом гранате с частотой повторения импульсов 10 кГц в режиме сканирования луча по поверхности с шагом сканирования ~ 10 мкм. Предварительно методом фототермической деформации поверхности (ФТДП) [3] определялась пороговая плотность падающей энергии $W_0 \approx 70$ мДж/см² и величина максимальных упругих (полностью обратимых) сдвиговых деформаций поверхности $\varphi = \partial u_z / \partial r \approx 4.7 \cdot 10^{-5}$ [3,4], где u_z — нормальные поверхностные смещения, r — расстояние по радиусу от центра лазерного пятна.

Основные изменения в системе поверхностных состояний наблюдались в диэлектрической пленке. На рисунке представлены спектры ОЗ МСД для необлученной поверхности (кривая 1), а также при переходе через W_0 (кривые 2–4). Обращает на себя внимание как общий рост $\Delta Q_{SS}(h\nu)$, так и сдвиги порогов ОЗ в область более низких энергий квантов света, связанные с дополнительными разрушениями GeO₂ порогового характера.

В термоупругом режиме облучения ($W < W_0$) [3,4] качественных изменений в спектрах ОЗ не происходит,



Спектры оптического заряжения медленных состояний диэлектрика на реальной поверхности германия до локального импульсного воздействия (1) и после облучения (2–4) с различной плотностью падающей энергии W (в единицах W_0 , где $W_0 = 70$ мДж/см² — плотность падающей энергии в центре лазерного пятна на пороге пластических деформаций): 2 — 0.85, 3 — 1.15, 4 — 1.6.

увеличивается лишь число перезаряжающихся медленных состояний, что свидетельствует о том, что пороги появления этих состояний меньше, чем W_0 , т.е. возникающие при локальном облучении напряжения в основном определяются "объемом" германия, а индуцируемые этими напряжениями деформации и смещения в пленке приводят к более низкороговым изменениям в GeO₂, что связано с различием термоупругих характеристик полупроводника и диэлектрической пленки.

Сдвиги порогов ОЗ МСД происходят при переходе к плотностям энергии $W > W_0$ и свидетельствуют о дополнительных разрушениях пленки GeO₂. При этом какого-либо заметного порогового увеличения плотности БС ($N_{FS} \approx 1 \cdot 10^{11}$, электрон/эВ · см), локализованных в Ge вблизи границы раздела диэлектрик-полупроводник [11] (и увеличения скорости поверхностной рекомбинации $S \approx 5 \cdot 10^2$ см/с), не наблюдалось. Интересно отметить, что в других условиях (нелокализованное облучение одним или несколькими наносекундными импульсами) существенные изменения МСД на реальных поверхностях германия отсутствовали (см., например, [13]).

На наш взгляд, наблюдаемый пороговый характер изменения спектров медленных состояний (в окисном слое) и отсутствие заметных изменений быстрых состояний свидетельствуют о том, что индуцируемые термонапряжениями пластические деформации (возникающие в германии при сдвиговых напряжениях порядка нескольких МН/м³ [3,4]) происходят не на поверхности полупроводника, а в его объеме. Эти (пластические) деформации и связанная с ними релаксация напряжений изменяют деформацию и на поверхности Ge, что и приводит к дополнительным разрушениям более чувствительной к остаточным деформациям (и смещениям) тонкой диэлектрической пленки.

Таким образом, проведены измерения изменений спектров поверхностных состояний при действии на по-

верхность германия локального импульсного лазерного облучения с амплитудой пороговых деформаций $\varphi \approx (4-5) \cdot 10^{-5}$. Показано, что именно медленные электронные состояния на реальной поверхности полупроводника могут служить чувствительным датчиком возникающих пластических деформаций.

Список литературы

- [1] C.S. Lee, N. Koumvakalis, M. Bass. Appl. Phys. Lett., **47**, 625 (1982); Opt. Eng., **22**, 419 (1983).
- [2] P.M. Fauchet. Phys. Lett., **93A**, 155 (1983).
- [3] А.Г. Барсков, С.В. Винценц. ФТТ, **36**, 2590 (1994).
- [4] С.В. Винценц, С.Г. Дмитриев. Письма ЖТФ, **21**, вып. 19, 1 (1995).
- [5] C.S. Lee, N. Koumvakalis, M. Bass. J. Appl. Phys., **54**, 5727 (1983).
- [6] S.S. Cohen, J.V. Bernstein, P.W. Wyatt. J. Appl. Phys., **71**, 630 (1992).
- [7] С.В. Винценц, С.Г. Дмитриев, О.Г. Шагимурагов. Письма ЖТФ, **22**, вып. 8, 8 (1996).
- [8] С.В. Винценц, С.Г. Дмитриев, О.Г. Шагимурагов. ФТТ, **38**, 993 (1996).
- [9] Ю.Ф. Новотоцкий-Власов. Тр. ФИАН СССР, **48** (1969).
- [10] Н.В. Карлов, Н.А. Кириченко, Б.С. Лукьянчук. Лазерная термохимия (М., Наука, 1992) гл. 15, с. 269.
- [11] А.В. Ржанов. Электронные процессы на поверхности полупроводников (М., Наука, 1971) с. 480.
- [12] P.K. Kashkarov, V.F. Kiselev, S.N. Kozlov. Surf. Sci., **75**, 251 (1978).
- [13] П.К. Кашкаров, В.Ф. Киселев. Изв. АН СССР. Сер. физ., **50**, 435 (1986).

Редактор В.В. Чалдышев

Threshold-type influence of local pulse laser irradiation on surface states of oxide layer on real germanium surface

S.V. Vintsents, S.G. Dmitriev, R.A. Zacharov[†], G.S. Plotnikov[†]

Institute of Radio Engineering & Electronics,
Russian Academy of Sciences,
141120 Fryazino, Russia
[†] Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract Spectral changes of surface electron states on the real (with a thin oxide film) germanium surface under the local (10–100 μm) pulse (0.1–1 μs) laser irradiation (with calculated values of the surface heating ~ 20–40 K) have been investigated using surface state spectroscopies. It's shown that the threshold of plastic deformations (such deformations are formed inside the semiconductor subsurface layer due to temperature-induced stresses) is accompanied by corresponding threshold-type changes of the slow surface electron states in the oxide layer, while no considerable changes of semiconductor fast states have been observed. The physical nature of the effect is discussed.

Fax: 7-(095)-203-84-14 (Vintsents)

E-mail: svv176@ire216.msk.su (Vintsents)