

К ВОПРОСУ О ВЕЛИЧИНЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ $p-n$ -ПЕРЕХОДОВ В КРЕМНИИ

Масленников Н. М.

Анализируются опубликованные данные о величине коэффициентов ионизации в кремнии. Выделена основная группа работ, в которой результаты измерений коэффициентов ионизации практически совпадают. Им соответствуют максимально возможные значения напряжений лавинного пробоя $p-n$ -переходов.

В малочисленной группе работ воспроизводимость и стабильность результатов хуже, завышенным значениям коэффициентов ионизации соответствуют меньшие значения напряжений пробоя, отмечается некоторое несоответствие расчетов с результатами измерений.

Расчету величины напряжения лавинного пробоя U_{BR} посвящены десятки работ. Наиболее известными и чаще всего цитируемыми являются работы [1-6]. Вопрос представлялся, по-видимому, решенным, поскольку в последние годы в зарубежной печати на эту тему статьи практически не публиковались.

Однако в отечественной литературе в работах [7-10] неизменно выражалось сомнение в надежности измерений коэффициентов ударной ионизации электронами α_n и дырками α_p и точности расчетов U_{BR} , выполненных в работах [2-6]. На основе собственных измерений [8] зависимости коэффициентов ионизации от напряженности поля $\alpha_{n,p}(E)$ авторы [9, 10] «надежно вычислили напряжение лавинного пробоя». В последней, весьма большой по объему работе [11], вновь утверждается, что «авторы большого числа работ использовали устаревшие и неточные зависимости $\alpha_{n,p}(E)$, поэтому систематические ошибки многих расчетов, в том числе и прделанных авторами работы [8], достигают десятков процентов». В связи с этим авторы предприняли очередную попытку повысить точность и универсальность расчетов U_{BR} . Рассмотрим, насколько утверждения авторов обоснованы, а расчеты U_{BR} достоверны.

Точность расчета U_{BR} зависит в основном от того, какие зависимости $\alpha_{n,p}(E)$ взяты для вычислений. Для экспериментального определения зависимости $\alpha_{n,p}(E)$ в большинстве работ использовался метод фотоумножения носителей заряда, инжектированных в область пространственного заряда (ОПЗ) перехода. Наиболее простой и надежный метод был разработан в работе [12]. Использовался контакт металл- n -Si. Инжекция носителей заряда осуществлялась в ОПЗ резкого перехода с линейным распределением напряженности поля. Для вычисления зависимости $\alpha_{n,p}(E)$ по данным экспериментов были выведены относительно простые формулы. Этот метод и эти же формулы использовали авторы работ [7-10] для обработки результатов измерений на резких p^+-n -переходах также с линейным распределением напряженности поля. Однако при анализе литературных данных авторы пренебрегли зависимостью $\alpha_{n,p}(E)$, полученной в работе [12], которая вместе с данными [13, 14] подтверждала надежность результатов измерений [1, 2].

В последней работе [11] для расчета U_{BR} авторы использовали меньшие, чем прежде, значения $\alpha_{n,p}$, которые были получены в результате усреднения практически всех известных зависимостей $\alpha_{n,p}(E)$. По-видимому, авторы убедились в том, что результаты прежних поспешных измерений $\alpha_{n,p}$, опубликован-

ные в работе [8], недостаточны точны, тем более что при измерениях, проведенных на большом количестве образцов, приготовленных из более совершенных слитков кремния, величина α_n оказалась на 40 % меньше прежних значений [8]. Разброс значений α_n , равный ± 25 %, свидетельствовал не о погрешности измерений, а о невысоком качестве исследуемых полупроводниковых структур.

Полученная в работе [11] точность вычисления U_{BR} , равная 0.1 %, представляется излишней, поскольку дело не в точности вычисления, а в том, какие зависимости $\alpha_n, p(E)$ использованы.

Автору данной работы представляется целесообразным не усреднять известные зависимости $\alpha_n, p(E)$, а обосновать, какие из них являются наиболее достоверными.

Известно, что ударная ионизация и пробой в полупроводниках во многом сходны с аналогичными явлениями в газах. Авторы работ [8-11] не обратили внимание на то, что в газах величина коэффициента ионизации зависит от наличия загрязнений [15]. В полупроводниках примеси или загрязнения должны проявлять себя одинаково. При этом необходимо иметь в виду, что основным местом осаждения примесей являются дефекты структуры. В ранних исследованиях [7-10] возможное влияние дефектов в кремнии на U_{BR} и величину α_n, p не рассматривалось вообще. В более поздней работе [16] не было выявлено влияние на U_{BR} таких дефектов, как дислокации. Это вполне естественно, поскольку характерный размер дефектов был значительно меньше ширины ОПЗ. Крупномасштабные дефекты с характерным размером, соизмеримым с шириной ОПЗ, вообще выявлены не были, поскольку применялась несовершенная методика исследований (дефекты не декорировались). Подобные дефекты, исследованные в работе [17], могли быть причиной того, что авторы работ [8, 9] измерили большие, а следовательно, и худшие значения α_n, p . Близкие с данными работы [8] значения α_n, p были получены лишь в двух работах [18, 20].

В работах [1, 2, 12-14] измерения проводились на тщательно отобранных, высококачественных образцах, вследствие чего авторы измерили меньшие значения α_n, p , а воспроизводимость результатов измерений была выше, чем в [8]. В каждой из работ [1, 18] большие значения α_n были измерены на приборах с более низким значением U_{BR} . Исследования [19], проведенные на образцах диаметром 52 и 58 мм, изготовленных из отечественного кремния современных марок, подтвердили эти результаты, показав, что меньшие значения U_{BR} высоковольтных структур коррелируют с данными $\alpha_n, p(E)$ работы [8], а большие — с данными работ [1, 2, 12-14].

Зависимости $\alpha_n, p(E)$, полученные в работах [1, 2, 12-14], дополняя друг друга, практически совпадают. Эти зависимости являются наиболее достоверными. Им соответствуют максимально возможные значения U_{BR} , приведенные в работах [3, 6]. Сопоставление U_{BR} по данным ряда работ приводится в таблице, на основании которой можно сделать некоторые выводы.

1. В работе [5] получены несколько меньшие, чем в работах [3-6], значения U_{BR} , что вполне закономерно, поскольку при расчете использовались большие значения α_n .

U_{BR} по данным ряда работ при двух значениях концентрации доноров для резки $p^+ - n$ -переходов в кремнии

Источник	U_{BR} , кВ		Источник для α_n, p
	10^{13} , см $^{-3}$	10^{14} , см $^{-3}$	
[3, 6]	9.2	1.8	[1]
[5]	8.9	1.6	[5]
[8, 10]	8.5	1.4	[8, 9]
[11]	8.4	1.4	α_n в 2 раза меньше, чем в [8, 9]

2. Еще меньшие значения U_{BR} получены в работах [9-11]. Ипользованные в работе [11] значения α_n в 2 раза меньше, чем в работах [9, 10], а U_{BR} оказалось практически одинаковым. Это вызывает недоверие к расчетам авторов работ.

3. Ипользованные в работах [9-11] значения α_n, ρ занижают U_{BR} и ориентируют на выпуск менее совершенных приборов.

Приведенные в таблице значения U_{BR} следует рассматривать как предельные, которые могут быть получены на приборах высокого класса независимо от их площади. По мнению авторов [9, 10] с увеличением площади $p-n$ -перехода U_{BR} должно уменьшаться. Это объясняется тем, что с увеличением площади $p-n$ -перехода пропорционально увеличивается полное число микроплазм, а следовательно, и вероятность появления низковольтных микроплазм. При увеличении площади $p-n$ -перехода до 50 см² уменьшение U_{BR} может достигать 10—30 %, что, по-видимому, согласуется с экспериментом. Однако исследования [17] показали, что влияние площади $p-n$ -перехода на U_{BR} проявляется иначе. Дело в том, что крупномасштабные дефекты образуются в процессе термообработки в основном на периферии пластин. Эти дефекты являются основной причиной уменьшения U_{BR} . При увеличении диаметра пластин растут термические напряжения, в результате чего число дефектов увеличивается. Количество дефектов зависит от исходных свойств того или иного слитка кремния и от технологии изготовления $p-n$ -перехода. Чем больше диаметр пластин, тем сложнее и качественнее должна быть технология, при которой подобные дефекты не будут образовываться. На экспериментальных $p-n$ -структурах диаметром 58 мм, в которых такие дефекты отсутствовали, U_{BR} практически совпадало с расчетным значением, т. е. снижения U_{BR} за счет площади $p-n$ -перехода не происходило.

Список литературы

- [1] Lee C. A., Logan R. A., Batdorf R. L., Kleimack J. J., Wiegman W. // Phys. Rev. 1964. V. 134. N 3A. P. 761—773.
- [2] Ogawa T. // Japan. J. Appl. Phys. 1965. V. 4. N 7. P. 473—484.
- [3] Sze S. M., Gibbons G. // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 8. N 5. P. 111—113.
- [4] Kokosa R. A., Davies R. L. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1966. V. ED-13. N 12. P. 874—881.
- [5] Van Overstraeten R., De Man H. // Sol. St. Electron. 1970. V. 13. N 5. P. 583—607.
- [6] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М., 1984. 456 с.
- [7] Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н., Кюрегян А. С., Мнацаканов Т. Т. // Преобразовательная техника. 1975. № 6 (65). С. 1—4.
- [8] Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н., Кюрегян А. С., Мнацаканов Т. Т., Шуман В. Б. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 4. С. 735—738.
- [9] Кюрегян А. С. // Автореф. канд. дис. М., 1975.
- [10] Расчет силовых полупроводниковых приборов. М., 1980. 184 с.
- [11] Кюрегян А. С., Юрков С. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 10. С. 1819—1827.
- [12] Woods M. H., Johnson W. C., Lampert M. A. // Sol. St. Electron. 1973. V. 16. N 3. P. 381—394.
- [13] Beartsch R. D. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1966. V. ED-13. N 12. P. 987.
- [14] Ruegg H. W. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1967. V. ED-14. N 5. P. 239—251.
- [15] Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М.—Л., 1950. 672 с.
- [16] Богородский О. В., Воронцова Т. П., ЖгUTOва О. С., Кирдяпкина Л. А., Кузьмин В. А., Кюрегян А. С., Локтаев Ю. М., Рыбачук Л. С., Сорокин Ю. Г., Шлыгин П. Н., Федоров В. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 7. С. 1419—1425.
- [17] Маслеников Н. М., Сидоров Ю. И., Фролова Т. П., Турикова Л. В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 156—158.
- [18] Grant W. N. // Sol. St. Electron. 1973. V. 16. N 10. P. 1189—1203.
- [19] Маслеников Н. М. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 7. С. 1325—1327.
- [20] Рожков В. А., Милюткин Е. А. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1455—1457.