

04;12

Филаментация и самофокусировка электронных пучков в вакуумных и газовых диодах

© В.И. Олешко^{1,2}, В.Ф. Тарасенко^{1,2}, А.Г. Бураченко¹, V.V. Nguyen²¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: oleshko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 12 декабря 2018 г.

Принято к публикации 27 декабря 2018 г.

Проведены экспериментальные исследования импульсных электронных пучков с высокой локальной плотностью. Показано, что в вакуумных и газовых диодах при наносекундной и субнаносекундной длительности импульса тока пучка и уменьшении межэлектродного зазора реализуются условия, при которых наблюдается кумуляция плотности энергии при взаимодействии электронов с анодом. Установлено, что средняя энергия электронов при филаментации и самофокусировке пучка электронов в вакуумном диоде ускорителя с током ~ 2 кА и напряжением холостого хода ~ 400 кВ составляет 50–100 кэВ, а плотность энергии 10^9 – 10^{10} Дж/см³. Подтверждено, что в газовом диоде плотность тока пучка может превышать 1 кА/см². Предполагается, что сверхплотные электронные пучки в вакуумных и газовых диодах образуются в результате лавинного размножения убегающих электронов в плазме катод-анодного зазора.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47526.17640

Созданием импульсных ускорителей электронов с энергиями в десятки-сотни кэВ занимались и продолжают заниматься во многих научных группах. Сильноточные электронные пучки (СЭП) нано- и субнаносекундной длительности с током ~ 1 кА и плотностью мощности 10^6 – 10^8 Вт/см² широко используются для различных приложений, в частности в радиационной физике и химии твердого тела [1,2], для диагностики природных и искусственных кристаллов [3,4], инициирования взрывного разложения высокочувствительных энергетических материалов [5,6].

В последнее время появились новые задачи, требующие реализации более высоких плотностей мощности электронных пучков $\sim 10^{10}$ – 10^{12} Вт/см². К ним можно отнести разработку методов атомной спектроскопии с испарением пробы СЭП, инициирование взрывного разложения слабочувствительных бризантных взрывчатых веществ, генерацию мощных ударных волн с интенсивностью, достаточной для откольного разрушения металлических мишеней. Часть этих задач была решена с применением явления самофокусировки СЭП, генерируемого в вакуумном диоде ускорителя электронов с генератором ГИН-600 [2]. Следует отметить, что исследования явления самофокусировки ранее обычно проводились с использованием релятивистских электронных пучков (РЭП) с током, превышающим ток Альфвена: $I_A = 17\beta\gamma$, где $\beta = v/c$, $\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$ — релятивистский фактор, v — скорость электронов пучка, c — скорость света. В экспериментах с РЭП ток составлял 100–200 кА и значительно превышал ток Альфвена (~ 20 кА) [7–9]. Было показано, что пучок фокусируется собственным магнитным полем, при этом первостепенную роль играет плазма, образующаяся в катод-анодном

промежутке. Что касается механизмов, ответственных за явления филаментации и самофокусировки электронного пучка в вакуумном диоде электронного ускорителя, ток которого значительно меньше тока Альфвена, то они до сих пор не выяснены и требуют специальных исследований.

Следует отметить, что неоднородности плотности тока при вакуумном пробое и эрозия анода наблюдались и при токах менее 500 А [10]. Были зарегистрированы микроканалы от острия отрицательной и положительной полярности, а также повреждение поверхности плоского электрода при разряде в воздухе атмосферного давления [11]. Увеличение плотности тока пучка убегающих электронов наблюдалось при уменьшении давления в диодах, заполненных различными газами [12]. Таким образом, из опубликованных работ известно о фокусировке тока пучка в вакуумных, а также в газовых диодах. Однако экспериментальных результатов изучения воздействия на анод при токах ускорителей ~ 1 кА весьма мало.

Цель настоящей работы — изучить условия получения филаментированных электронных пучков с большой локальной плотностью тока в вакуумных и газовых диодах и по результатам исследований оценить их характеристики: пространственное распределение, энергию электронов, а также плотность энергии.

Эксперименты были проведены на двух установках. В установке № 1 (максимальная энергия электронов $T \sim 400$ кэВ, длительность импульса тока на полувысоте $\tau_{0.5} = 12$ нс, наибольший ток пучка за Al-фольгой толщиной 20 мкм $I_{\max} \approx 2$ кА) использовался генератор ГИН-600 [13], к которому подключался вакуумный диод. Вакуумный диод был образован трубчатым катодом и

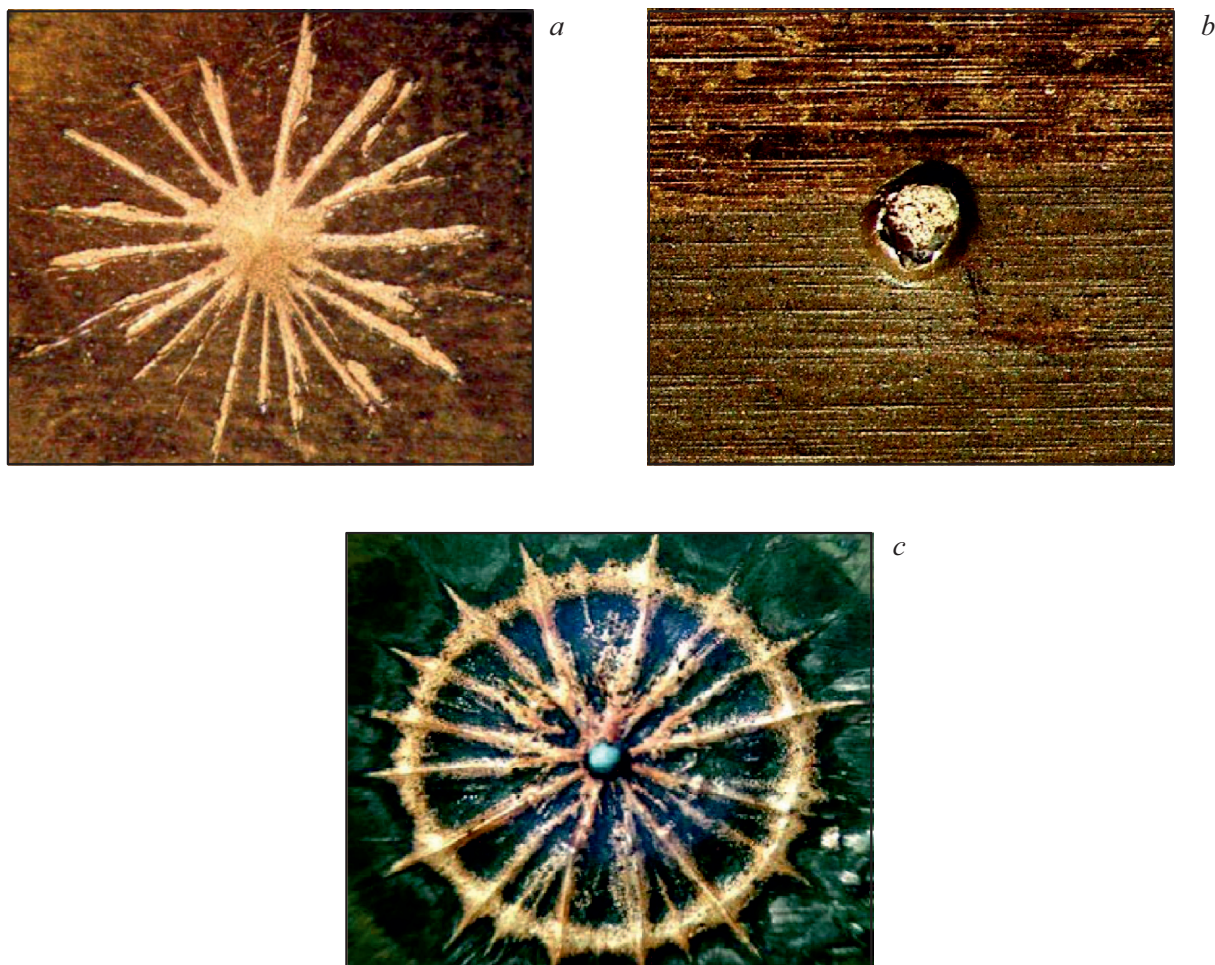


Рис. 1. Фотографии эрозионных следов отдельных токовых каналов „автографов“, образовавшихся на поверхности анодов при облучении СЭП в режиме филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде ускорителя с генератором ГИН-600. *a, b* — фотографии облучаемой и тыльной поверхностей медной фольги толщиной $180\ \mu\text{m}$ за один импульс облучения, *c* — эрозионный след на поверхности медной пластины толщиной $2\ \text{mm}$ после многоимпульсного облучения.

плоским анодом. Аспектное отношение $g = R/d$ (где R — радиус катода, d — межэлектродный зазор) варьировалось в диапазоне $0.7\text{--}1$. Процесс фокусировки исследовался по следам эрозии на анодных пластинах из различных металлов („автографам“ электронного пучка) с помощью оптической микроскопии с пространственным разрешением $\sim 10\ \mu\text{m}$.

В установке № 2 ($T \sim 250\ \text{keV}$, $\tau_{0.5} \approx 0.1\text{--}0.5\ \text{ns}$, $I_{\text{max}} \approx 100\text{--}500\ \text{A}$) использовался генератор СЛЭП-150, к которому подключался газовый диод [12]. Длительность импульса тока сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) на полувысоте зависела от давления азота. Катод также был выполнен в виде трубки диаметром $6\ \text{mm}$. Анод газового диода был выполнен из сетки с прозрачностью 64% по свету, на которую помещалась Al- или AlBe-фольга. Аспектное отношение варьировалось в диапазоне $0.25\text{--}1.5$. В ряде экспериментов фольга убиралась и через сетку можно было регистрировать форму разряда. При фотографировании „автографов“ электронного пучка за сеткой и Al-фольгой

устанавливался люминофор, а за ним помещалось окно из кварца. Газовый диод откачивался форвакуумным насосом и заполнялся азотом. Максимальные амплитуды тока пучка достигались при давлениях азота в единицы кПа.

Наиболее интересные результаты по воздействию пучка электронов на анод были получены при филаментации и самофокусировке СЭП в вакуумном диоде. Характерные следы эрозии („автографы“ электронного пучка), образующиеся на поверхности медного анода за один импульс облучения при величине катод-анодного зазора $d = 3\ \text{mm}$ и радиусе полого цилиндрического катода $R = 3\ \text{mm}$, приведены на рис. 1, *a*.

Видно, что в результате единичного импульса воздействия на поверхности анода формируется геометрическая фигура, напоминающая „звезду“, среднее число „лучей“ в которой составляет ~ 20 при диаметре фигуры $\sim 7\text{--}8\ \text{mm}$. Более детальное изучение „автографа“, полученного на медной фольге толщиной $180\ \mu\text{m}$, позволило определить геометрические параметры отдель-

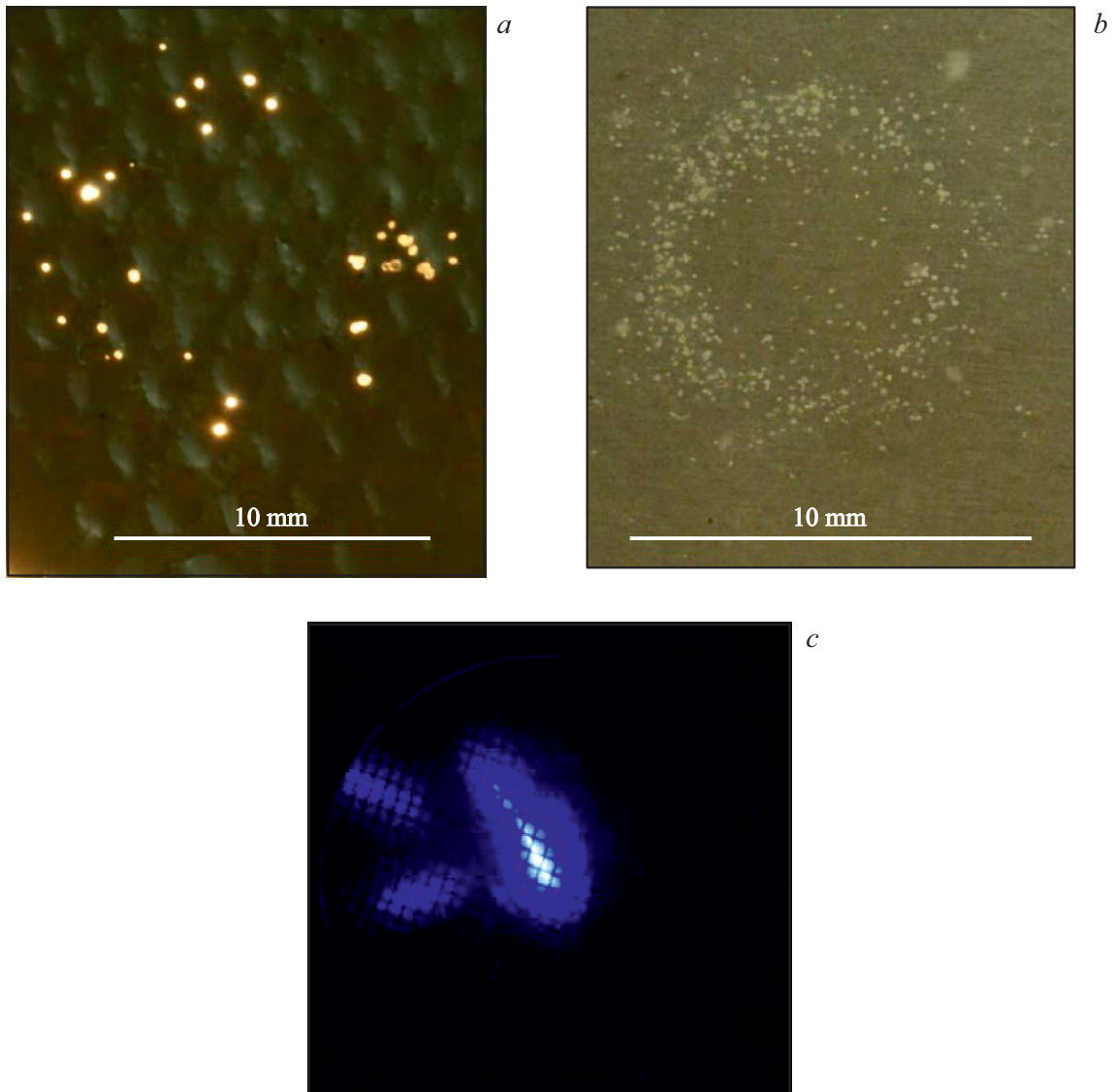


Рис. 2. Фотографии повреждений анодной фольги (*a, b*) и свечения люминофора (*c*) за фольгой под воздействием пучка электронов. *a* — азот, 760 Torr, зазор 4 mm, фольга Al ($10\ \mu\text{m}$), 20 импульсов; *b* — азот, 760 Torr, зазор 8 mm, фольга AlBe ($60\ \mu\text{m}$), 200 импульсов; *c* — азот, 9 Torr, зазор 12 mm, фольга Al ($10\ \mu\text{m}$), 1 импульс.

ных „лучей“: ширина эрозионного следа изменялась в пределах $\sim (70\text{--}150)\ \mu\text{m}$, глубина $\sim (10\text{--}15)\ \mu\text{m}$, диаметр центрального кратера $\sim 1.0\text{--}1.5\ \text{mm}$. При этом на тыльной стороне медной мишени наблюдался откол (рис. 1, *b*). В латунном аноде толщиной $60\ \mu\text{m}$ за один импульс образовывалось отверстие диаметром $\sim 1.3\ \text{mm}$. Многоимпульсное облучение медного анода толщиной в 2 mm приводило к появлению на периферии „лучей“ эрозионного кольца (рис. 1, *c*). На отдельных фотографиях „автографов“ наблюдалось слияние двух близкорасположенных „лучей“ в один. Одновременно с „лучами“ на облучаемой поверхности мишеней часто формируются локальные эрозионные следы (незавершенные „лучи“), вытянутые в направлении от периферии к центру пятна самофокусировки.

В экспериментах с алюминиевым анодом толщиной $100\ \mu\text{m}$ в пятне самофокусировки за один импульс наблюдались отколы как на тыльной, так и на облучаемой поверхности с формированием сквозного отверстия. При этом „розетка“ разрыва, расположенная на тыльной поверхности мишени, раскрывалась в направлении распространения электронного пучка, а „розетка“, расположенная на облучаемой поверхности, — навстречу электронному пучку. Следовательно, максимум энерговыделения самосфокусированного электронного пучка был расположен близко к центру облучаемой мишени (т.е. на глубине $\sim 40\text{--}50\ \mu\text{m}$), что и приводит к одновременному отколу как облучаемой, так и тыльной поверхности мишени с формированием сквозного отверстия. Из экспериментально определенных величин

(максимума энерговыделения в алюминиевой мишени и откольной прочности меди) были оценены средняя энергия электронов в филаментах и объемная плотность энергии в пятне самофокусировки, которые составили 50–100 keV и 10^9 J/m³ соответственно.

Полная энергия электронного пучка с генератором СЛЭП-150 была меньше на два порядка при малых давлениях в газовом диоде и в 10^4 раз при давлении азота 100 кПа, чем в случае электронного пучка с генератором ГИН-600. Однако и в этих условиях наблюдалось повреждение анодной фольги как при уменьшении межэлектродного зазора, так и при уменьшении давления в диоде. При этом при уменьшении межэлектродного зазора повреждение фольги наблюдалось в более широком диапазоне давлений. На рис. 2, *a* показаны отверстия в Al-фольге толщиной 10 μ m при межэлектродном зазоре 4 mm и давлении азота 100 кПа. На рис. 2, *b* приведены автографы электронного пучка при межэлектродном зазоре 8 mm и давлении азота 100 кПа. Толщина фольги и число импульсов были увеличены.

При увеличении межэлектродного зазора до 12 mm и давлении азота 11.8–100 кПа разряд состоял из нескольких диффузных струй, имеющих форму конуса с диаметром основания в несколько миллиметров, которые начинались с катода. На фотографиях интегрального свечения разряда в азоте и других газах яркие пятна обычно были видны только на кромке катода. В этих условиях повреждения анода из Al-фольги не наблюдалось. „Автограф“ тока пучка, полученный по свечению люминофора за Al-фольгой, представляет собой равномерно распределенное по поверхности анода свечение. Однако уменьшение давления в газовом диоде приводило к появлению диффузных каналов и фокусировке тока пучка. На рис. 2, *c* показано свечение люминофора при давлении 1.2 кПа и зазоре 12 mm. В центре фольги видно яркое пятно, которое наблюдалось и за толстыми фольгами из Al, что подтверждает генерацию убегающих электронов с высокой энергией.

Проведенные исследования показывают, что в вакуумных и газовых диодах при общем токе в сотни ампер–единицы килоампер возникают условия (прежде всего при уменьшении межэлектродных зазоров и образовании анодной плазмы), при которых происходит существенное увеличение плотности тока пучка. При этом продолжается генерация электронов с высокой энергией и повреждается анод. В вакуумном диоде с генератором ГИН-600 генерация пучков электронов большой плотности приводила к эрозии поверхности анодов и образованию отверстий в тонких фольгах, а также отколов с прямой и обратной стороны, в том числе при одном импульсе тока пучка. Так, при подборе толщины Al-фольги отколы были получены одновременно с обеих сторон облучаемой мишени.

На основании результатов, полученных в настоящей работе, и известных данных по самофокусировке плотных сильноточных РЭП [7–9, 14] можно представить последовательность процессов, приводящих к филамента-

ции и самофокусировке электронного пучка в вакуумном диоде электронного ускорителя с генератором ГИН-600. В начале процесса, до появления анодной плазмы, в диоде с полым цилиндрическим катодом наблюдается ламинарный поток электронов, формируемый из катодной плазмы. Под действием электронной бомбардировки возникает анодная плазма, которая образуется в результате десорбции газов с поверхности анода и испарения диэлектрических и полупроводниковых включений с последующей их ионизацией. При взаимодействии электронного пучка с анодной плазмой развивается нитевидная неустойчивость, приводящая к филаментации электронного пучка (разбиению его на 18–20 нитей токовых каналов). По-видимому, как и в случае РЭП с большими токами, каждый канал привязан к центру взрывной электронной эмиссии. По мере роста тока в филаментах за счет лавинообразного размножения быстрых электронов величина магнитного поля возрастает, что приводит к схлопыванию филаментированных микропучков в центральное пятно фокусировки. Таким образом, в вакуумном диоде формируются два электронных пучка с различными пространственно-временными и энергетическими характеристиками: однородный высокоэнергетический и филаментированный с меньшей энергией электронов.

В газовых диодах происходят подобные процессы, начало которых облегчается наличием газа в диоде. Мы полагаем, что наиболее вероятным механизмом генерации сверхплотных филаментированных электронных пучков в вакуумных и газовых диодах является пробой на убегающих электронах, развивающийся в плазме катод-анодного зазора.

В заключение отметим, что повреждение внутренней поверхности камеры, которая заполняется дейтерием и тритием в установках типа ТОКАМАК [15], также может происходить за счет филаментации и самофокусировки пучков убегающих электронов.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 18-19-00184 и частично за счет гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (номер проекта ВИУ_ИФВТ_73/2017).

Список литературы

- [1] Высокоэнергетическая электроника твердого тела / Под ред. Д.И. Вайсбурда. Новосибирск: Наука, 1982. 227 с.
- [2] Олешко В.И. Пороговые процессы в твердых телах при взаимодействии с сильноточными электронными пучками. Докт. дис. Томск, 2009. 317 с.
- [3] Соломонов В.И., Михайлов С.Г. Импульсная катодолуминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 182 с.
- [4] Sorokin D.A., Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., Bakshi E.Kh., Lipatov E.I., Lomaev M.I. // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. N 15. P. 154902.

- [5] Кригер В.Г., Каленский А.В. // Хим. физика. 1995. Т. 14. № 4. С. 152–160.
- [6] Олешко В.И., Зарко В.Е., Лысык В.В., Ципилев В.П., Калмыков П.И. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 11. С. 10–15.
- [7] Ликсонов В.Д., Сидоров Ю.Л., Смирнов В.П. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19. В. 8. С. 516–520.
- [8] Goldstein S.A., Davidson R.C., Siambis J.G., Roswell L. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 33. N 25. P. 1471–1474.
- [9] Тарумов Э.Э. Получение и фокусировка сильнооточных релятивистских электронных пучков в диодах // Генерация и фокусировка сильнооточных релятивистских электронных пучков / Под ред. Л.И. Рудакова. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 122–181.
- [10] Проскуровский Д.И., Ротштейн В.И., Шубин А.Ф., Янкевич Е.Б. // ЖТФ. 1975. Т. 45. В. 10. С. 2125–2143.
- [11] Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В., Горелов Е.В., Морозов И.В., Тренькин А.А., Харитонов С.Ю. // ЖТФ. 2018. Т. 88. В. 6. С. 827–831.
- [12] Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Бакиш Е.Х. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 883–887.
- [13] Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Семин Б.М., Шпак В.Г. // ПТЭ. 1981. № 4. С. 15–18.
- [14] Welch D.R., Rose D.V., Oliver B.V., Schamiloglu E., Hahn K., Maenchen J.E. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. N 2. P. 751–760.
- [15] Savrukhin P.V., Shestakov E.A. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. N 4. P. 043016.