

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКСОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

006.3:537.3

**ВЗРЫВАЮЩИЕСЯ ПРОВОЛОЧКИ \*)**

Уже почти два столетия известно, что если по тонкой проволочке внезапно пропустить большой электрический ток, она взрывается. На протяжении этого времени данный эффект чаще всего рассматривали как любопытное, но не очень полезное явление, и даже теперь не существует единства во взглядах относительно того, какой именно механизм лежит в основе такого взрыва. Однако в современной технике взрывающиеся проволоочки нашли разнообразное и широкое применение, и возрождение научного интереса привело за последние годы к трем конференциям по данному вопросу. Предлагаемый краткий обзор содержит сообщение о последней конференции, состоявшейся в марте 1964 г.

10 марта 1964 г. в Кенморский отель города Бостона съехалось около двухсот ученых, чтобы обсудить «взрывающиеся проволоочки» — явление, впервые описанное в 1773 г. в Лондонском Королевском обществе. За прошедшее с тех пор время экспериментами в этой области занимались такие выдающиеся деятели, как Фарадей, Резерфорд и позднее Дж. Андерсон, астроном обсерватории Маунт-Вилсон.

Но несмотря на то, что явление взрывающихся проволоочек было описано так давно и им интересовались столь крупные ученые, большинство физиков знает о нем в действительности очень мало. Поэтому, прежде чем описывать конференцию, стоит сказать несколько слов о взрывающихся проволоочках.

Взрыв происходит при внезапном пропускании очень большого тока по тонкой проволочке, например, тока в  $150\,000\text{ а}$  за  $1,5\text{ мксек}$  по медной проволочке диаметром  $0,5\text{ мм}$ . Сам взрыв длится примерно 50 наносекунд ( $50 \cdot 10^{-9}\text{ сек}$ ). Возникает яркая вспышка света и раздается звук, как от взрыва 40-мм артиллерийского снаряда; при этом разрушительная сила равна разрушительной силе запальной трубки из бризантного взрывчатого вещества. Выглядит это довольно эффектно и совершенно бесполезно; тем не менее взрывающиеся проволоочки играют в настоящее время важную роль во многих устройствах и установках. Взрывающиеся проволоочки находят применение в первую очередь благодаря своей способности непосредственно воспламенять сильно взрывчатые вещества, без обычных в таких случаях промежуточных иницирующих гремучих веществ. В ракетах или спутниках такое свойство особенно важно, и взрывающиеся проволоочки очень широко используются именно с этой целью. В качестве взрывчатого вещества проволоочки могут быть использованы и для поточного производства мелких деталей на основе недавно разработанного процесса штамповки взрывом.

До этих недавних открытий взрывающиеся проволоочки практически использовались мало. В 1774 г. Нееэрн впервые применил взрывающиеся проволоочки для доказательства того, что электрический ток во всех частях последовательно соединенной цепи одинаков. Эта идея была не вполне очевидна естествоиспытателям XVIII в.; представлялось вполне вероятным, что «электрическая жидкость» расходуется по мере протекания в направлении к «земле». Располагая проволочку в различных местах 48-футового проводника, Нееэрн резюмировал: «Я не мог заметить ни малейшей разницы в том, как плавилась проволочка, помещенная в различные части цепи». Но это был единичный случай, и взрывающиеся проволоочки не применялись вплоть до 1920 г., когда на этот раз Дж. Андерсон использовал их в спектроскопических исследованиях для получения высоких температур. Андерсон так заинтересовался взрывающимися проволоочками, что провел серьезные исследования в этой области и опубликовал несколько работ по данному вопросу.

\*) W. G. Chace, Exploding Wires, Physics Today 17, No. 8, 19 (1964). Перевод Д. Г. Санникова.

После второй мировой войны взрывающиеся проволочки нашли важное применение. Они могут служить источником света при высокоскоростном фотографировании и для получения фотографий взрыва. Было найдено также, что взрывающиеся предохранители можно использовать в сверхвысоковольтных цепях, вместо обычных «перегорающих» предохранителей.

В настоящее время, как уже указывалось, взрывающиеся проволочки широко используются в управляемых снарядах и в космической технике. Мощное электро-

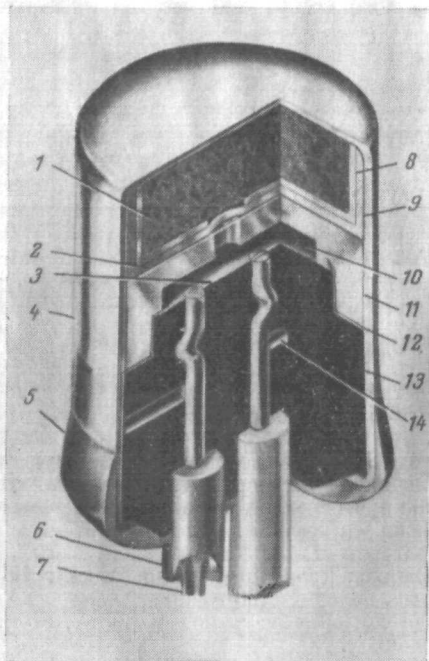


Рис. 1. Взрывающийся проволочный мостик в запальной трубке для воспламенения основного взрывчатого заряда баллистической ракеты.

1 — Взрывчатое вещество; 2 — изоляционный материал; 3 — проволочный мостик; 4 — корпус; 5 — водонепроницаемая оболочка; 6 — изоляция подводящего провода; 7 — подводящий провод; 8 — металлическая прослойка; 9 — чашечка с диафрагмой, образующая с корпусом фардеевский экран; 10 — воздушное пространство; 11 — прокладка; 12 — наполнитель; 13 — пробка; 14 — воздушный зазор.

с целью изучения разрушающего действия микрометеоритов. Этой теме было посвящено несколько докладов на Второй конференции<sup>2</sup>, а статья Бона, Надига и Симмонса<sup>3</sup> содержит изложение дальнейшего развития данной техники. Большая плотность энергии или, точнее, большой удельный импульс взрыва проволочки может быть, по-видимому, использован также для управления спутником и контроля за его положением в пространстве.

Взрыв осуществляется путем разряда заряженной батареи конденсаторов через проволочку. Батарея состоит из специальных малоиндуктивных конденсаторов, при этом соединительные провода тщательно подобраны таким образом, чтобы индуктивность была минимальной; с той же целью специально сконструирован и замыкатель. Общий вид подобной батареи показан на рис. 2. Батарея имеет емкость 90 мкф и может быть заряжена до 20 кВ. Каждый из конденсаторов по 15 мкф имеет свой собственный тригготронный замыкатель, а соединительные провода представляют собой плоские медные пластинки с тонкой майларной изоляцией.

Рассматриваемое явление изучается при помощи электрических измерений, высокоскоростного фотографирования, спектроскопов, интерферометров и в самое

магнитное излучение, связанное с запуском ракет или спутников (сигналы управления, сигналы радаров и радиомаяков), представляет серьезную трудность для проблемы инициирования взрывающихся веществ, столь важной при операциях подобного рода. Взрывающиеся болты разделяют отдельные ступени ракеты, взрывающиеся воспламенители запускают ракетные двигатели в нужный момент времени, некоторые приборы управления и защиты приводятся в действие взрывом. Взрывчатое вещество в таких устройствах обычно воспламеняется в результате многоступенчатого процесса. Начинается он с «проволочного мостика» — тонкой проволочки, которая, накаляясь, воспламеняет инициирующее взрывчатое вещество (черный порох или гремучую смесь); последнее в свою очередь воспламеняет менее активное вещество (например, PETN), которое уже воспламеняет главный заряд. Вполне может случиться, что тонкий проволочный мостик, поглотив высокочастотную энергию, нагреется до достаточно высокой температуры и несвоевременно воспламенит заряд. Чтобы предотвратить такое неправильное срабатывание, обычный проволочный мостик заменяется взрывающимся проволочным мостиком. Вероятность того, что проволочка случайно поглотит достаточно для своего взрыва количество высокочастотной энергии, ничтожна мала. Кроме того, инициирующее первичное взрывчатое вещество оказывается ненужным, так как взрывающийся проволочный мостик непосредственно воспламеняет PETN (рис. 1). Подобное использование взрывающихся проволочек является основным.

Другим вопросом космической техники, который решается при помощи взрывающихся проволочек, является проблема противодействия сверхвысокоскоростным микрометеоритам. Большая плотность энергии взрывающегося проводника может быть использована для ускорения мельчайших частиц

последнее время при помощи рентгеновских импульсов продолжительностью в наносекунды.

Измерение очень больших (от 100 000 до 200 000 а) быстроменяющихся электрических токов производится при помощи специально сконструированных коаксиальных шунтов<sup>4</sup> или магнитных зондов, показания которых ( $dI/dt$ ) могут быть затем

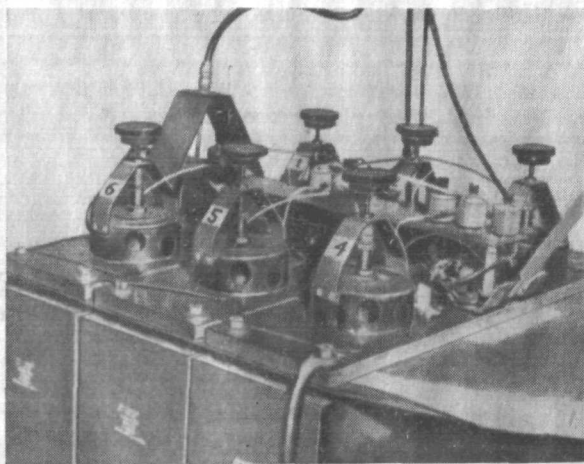


Рис. 2. Источник энергии для взрывающихся проволочек из шести конденсаторов, каждый со своим триггерным замыкателем.

проинтегрированы на  $RC$ -интеграторе для получения  $I(t)$ . Типичные графики тока  $I$  и его производной  $dI/dt$  представлены на рис. 3. Идеализированная кривая тока приведена на рис. 4. Если проволочка не взрывается, то наблюдается типичный осциллирующий слабозатухающий разряд, изображенный пунктирной линией. Когда же

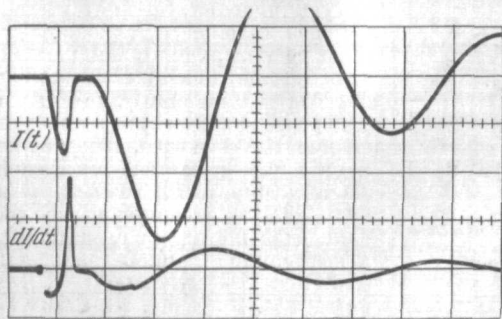


Рис. 3. Осциллограммы тока  $I$  и его производной  $dI/dt$  при взрыве проволочки.

Медная проволочка длиной 3 дюйма; напряжение 12 кэ; скорость развертки 2 мксек на 1 деление.

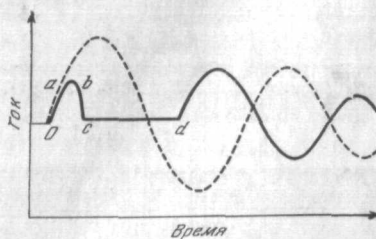


Рис. 4. Идеализированный график тока.

проволочка взрывается, ток внезапно падает (сплошная линия) от величины приблизительно 150 000 а до низкого значения (около 150—200 а) и остается таким сравнительно длительное время (до 20 мксек); затем ток внезапно возрастает и продолжает, затухая, осциллировать до тех пор, пока конденсаторы не разрядятся. Период слабого тока называется «паузой тока», а внезапный подъем в конце паузы—«повторным разрядом».

Остается еще много неясного в явлении взрывающихся проволочек, и поэтому не достигнуто еще единства во взглядах относительно самого механизма взрыва. Однако большинство ученых, работающих в данной области, будут в основном, а некоторые даже полностью, согласны с картиной явления, приводимой ниже.

При включении ток начинает возрастать, подчиняясь обычному уравнению для  $RLC$ -контура

$$E = RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{c} \int I dt.$$

Однако линейное решение этого уравнения не может быть использовано, так как сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  меняются из-за нагрева проволоочки. За несколько наносекунд температура проволоочки достигает точки плавления, и появляется другая нелинейность, связанная с тем, что при температуре фазового перехода две фазы обладают различным сопротивлением. При взрывах проволочек, исследованных в лаборатории автора, время пребывания в жидком состоянии было настолько мало, что форма не успевала существенно измениться, т. е. проволочка оставалась жидким цилиндром, а развивающиеся неустойчивости сказывались лишь во втором порядке малости. Однако если внешняя цепь ограничивает рост тока так, что проволочка остается в жидкой фазе в течение нескольких микросекунд, то неустойчивости значительно изменяют форму проволочки (например, делают ее волнообразной) и, таким образом, появляются новые осложнения.

В случае более простого, более быстрого процесса жидкий цилиндр продолжает разогреваться все возрастающим током, пока не достигнет нормальной температуры кипения. Из-за отсутствия центров кипения внутри жидкости и на ее поверхности жидкий металл («удерживаемый» только благодаря инерции) не кипит, а перегревается и при этом очень сильно. По мере того, как жидкий металл перегревается, он продолжает расширяться. Точный механизм такого расширения все еще находится в стадии изучения, и на конференции данной проблеме были посвящены доклады Ф. Беннета и М. Кофмана. Но каким бы образом ни осуществлялось расширение, расширившийся металл обладает значительно большим сопротивлением, которое, согласно теории, возрастает пропорционально высокой степени радиуса. В конце концов при расширении наступает момент, когда материал уже не ведет себя как металл. Ток почти прекращается, индуктивное напряжение ( $-L dI/dt$ ) становится

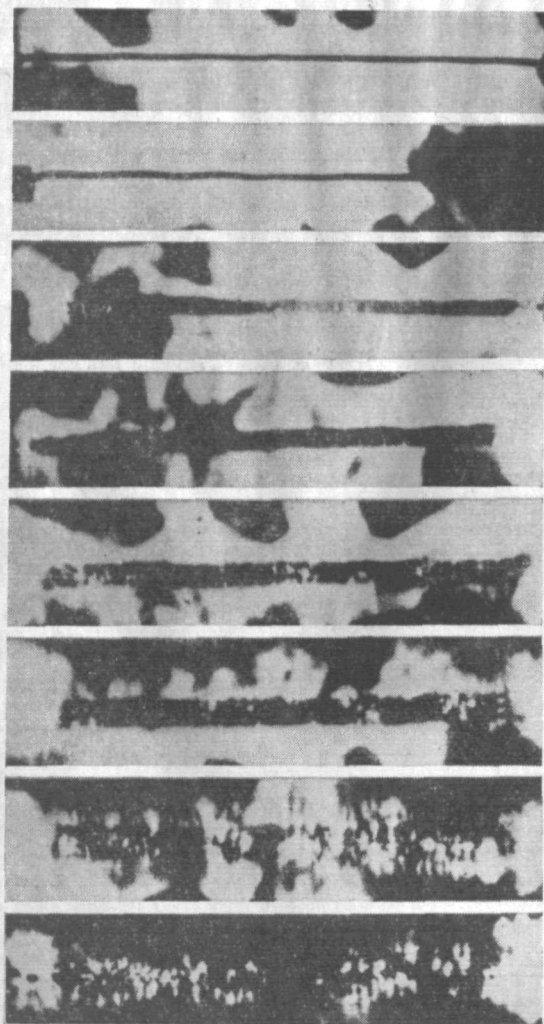


Рис. 5. Медная проволочка (диаметр 0,5 мм, длина 10 см), взрывающаяся при 10 кэ.

Экспозиция 0,5 мксек; промежуток времени между отдельными кадрами около 0,75 мксек. Нерегулярные белые пятна позади — результат подсветки взрывающейся проволоочки. Верхний кадр изображает проволочку перед моментом включения тока.

очень большим и проволочка взрывается. При взрыве материал проволоочки принимает свойства газа. Плотность этого газа очень высока (давление приблизительно  $34 \cdot 10^3$  атм), а температура составляет несколько десятков тысяч градусов Кельвина. Из-за высокой плотности газа и малой средней длины пробега ударная ионизация (лавина) не имеет места и слабый ток поддерживается электронами и ионами, возникающими в процессе термоионной и термоэлектронной ионизации. Газовый цилиндр



быстро расширяется, так как ничто, кроме инерции и окружающей атмосферы, этому не препятствует; плотность его падает, а средняя длина пробега возрастает. Когда средняя длина пробега достигает критического значения для образования лавины, число носителей тока быстро увеличивается, возникает электрическая дуга и начинается повторный разряд. Возникшая электрическая дуга снимает оставшийся на конденсаторе заряд.

Высокоскоростные фотографии взрывающихся проволочек показаны на рис. 5 и 6. Рис. 5 составлен из фотографий различных проволочек, из которых каждая

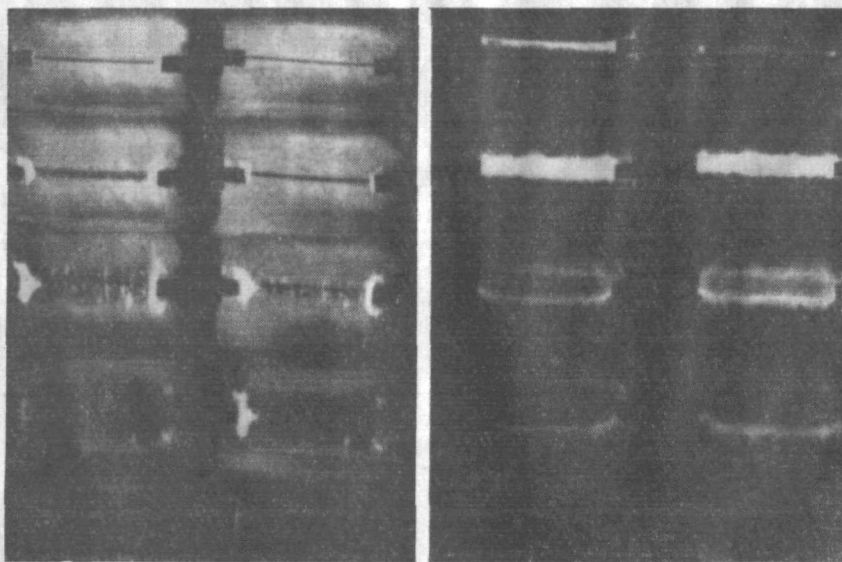


Рис. 6. Медная проволочка (диаметр 0,5 мм), взрывающаяся при 6 кв.

Экспозиция 0,1 мсек, интервал 0,5 мсек. Фотография слева — взрыв при атмосферном давлении; справа — при давлении  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Каждая фотография состоит из десяти кадров, последовательность которых: верхний ряд — слева направо; второй ряд — справа налево и т. д.

заснята в последующие моменты взрыва с экспозицией около 0,5 мсек. На рис. 6 каждая совокупность кадров изображает последовательные моменты взрыва одной отдельной проволочки.

Приборы, используемые в качестве источников питания, а также для управления процессом и для измерений, должны прежде всего обладать низкой индуктивностью. Поэтому требуется очень тщательная отработка всех элементов цепи. Это касается конденсаторов, проводов, ведущих от конденсаторов к проволочке, системы включения, измерительных приборов и держателей проволочки. Хотя идеальные условия и не достигнуты, эта проблема взрывающихся проволочек разработана достаточно хорошо. Поэтому на конференции 1964 г. аппаратура не была впервые главной темой обсуждения. Только один доклад, а именно доклад Тролана, Гарбонира, Коллинса и Гюнтера был посвящен новым источникам питания и новым методам управления.

#### КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВЗРЫВАЮЩИМСЯ ПРОВОЛОЧКАМ 1964 г.

На конференции, проходившей в Кенморском отеле города Бостона, присутствовало около 200 делегатов из 22 штатов и пяти зарубежных стран. Программа состояла из 26 докладов и одного обзорного доклада Г. Бартельса и Г. Бортельда из Института плазменной физики в Ганновере по проводимым в ФРГ исследованиям в области взрывающихся проволочек. Последним пунктом программы было обсуждение новых открытий, доложенных на конференции, которое превратилось фактически в обсуждение вообще всех проблем взрывающихся проволочек. Единственным запланированным общественным мероприятием был легкий ужин.

Особенностью настоящей конференции было чувство зрелости, которое отличало ее от более ранних конференций. Это, несомненно, вызвано отчасти тем, что после двух предшествующих конференций ученые, работающие в данной области, были уже

знакомы друг с другом. Каждый был известен либо своей специализацией, либо излюбленными теориями, либо какими-то личными качествами. Поэтому никто не удивлялся, когда, например, Г. Леопольд стал докладывать о взрывающихся проволоочных мостиках, когда доктор Сакурай по-прежнему настаивал на строгом применении теории ударных волн к взрывающимся проволочкам, когда доктор Мейнингер применил к рассматриваемому явлению строгую электротехническую теорию или когда группа АЕС из Сандиа и Лос-Аламоса продемонстрировала дальнейшее использование своего «интеграла действия».

Некоторые «новички» принесли с собой молодость и энергию, так что наша зрелость не была «средневозрастной тяжеловесностью». В работе Линхарта и Шенка из лаборатории Фраскати в ЦЕРНе для изучения взрывающихся проволочек были использованы методы плазменной физики. Это, разумеется, многообещающий подход.

М. Кофман из Оклахомского университета взял на себя трудную задачу применить термодинамику к самой ранней стадии взрыва проволоочки. Рошфейн из Бостона провел очень интересное сравнение взрыва проволоочки с явлением разбрызгивания в электродных пятнах дуги. Это сходство, являющееся пока что чисто качественным, наводит на серьезные размышления.

Совершенно новому использованию взрывающихся проволочек был посвящен доклад М. Джонсича и Д. Рью, в котором говорилось о неорганическом синтезе бинарных соединений. Авторы рассказали об удачном синтезе иодидов, сульфидов и карбидов магния и алюминия с высоким 60%-ным выходом.

В обзорном докладе, сделанном доктором Бортфельдом, излагаются работы, которые ведутся в одном из наиболее активных европейских центров по исследованию взрывающихся проволочек. Доктор Бортфельд отметил, что взрывающиеся проволочки являются самым удобным источником получения плазмы высокой плотности и что работа в Ганновере направлена на изучение этой плазмы как таковой, а также на ее использование в качестве источника для других плазменных исследований. В одном из экспериментов, описанных им, большая батарея конденсаторов разряжалась через плазменный цилиндр, образованный в результате взрыва проволоочки, который произошел на несколько микросекунд ранее. Возникающий пинч-эффект изучался при помощи электрических измерений и оптической системы с большим разрешением, предложенной в 1950 г. Бартельсом<sup>5</sup> и обычно называемой «туннельной камерой». Она использовалась для получения одновременно фоторазвертки и отдельных снимков, а также одновременно развертки картины свечения и спектрограмм. Было продемонстрировано большое количество снимков. Доклад вызвал многочисленные вопросы и обсуждение.

Четыре доклада были посвящены проблеме взрывающихся проволоочных мостиков. Г. Леопольд из Военно-морской артиллерийской лаборатории рассказал об экспериментах, в которых исследовалась связь между параметрами проволоочки: длиной, диаметром, материалом, с одной стороны, и надежностью, воспроизводимостью и силой взрыва, с другой. Тэкер и Нейр в двух докладах изложили метод, с помощью которого можно рассчитывать систему взрывающегося проволоочного мостика по взрыв-

ному току и «действию» ( $\int I^2 dt$ ). Блэкберн и Рейтель из Лос-Аламоса обсудили методы изучения таких систем при помощи развертки изображения электроннооптическим преобразователем.

В заключение можно сказать, что конференция выявила возросшее использование взрывающихся проволочек в системах взрывающихся проволоочных мостиков для ускорения маленьких частиц и для генерации ударных волн и волн напряжения.

Успешное применение взрывающихся проволочек привело, как видно, к сокращению теоретических исследований, ибо ощущался явный недостаток в докладах по теоретическому исследованию с чисто научной точки зрения и количественному изучению самого явления взрывающихся проволочек.

У. Чейс

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E. N a i r n e, Phil. Trans. Roy. Soc. (London) 64, 79 (1774).
2. W. G. C h a s e, H. K. M o o r e, Eds., Exploding Wires, vol. 2, Plenum Press, N. Y., 1962.
3. J. L. B o h n, F. H. N a d i n g, W. F. S i m m o n s, в сб. Accelerations of Small Particles by Means of Exploding Wires.
4. J. H. P a r k, J. Res. Natl. Bur. Std. 39, 191 (1947).
5. H. B a r t e l s, B. E i s e l t, Optik 6, 56 (1950).